



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE VIANA DO CASTELO

Rui Manuel Gonçalves Franco

POTENCIAL ENERGÉTICO DO ATERRO SANITÁRIO DO  
VALE DO LIMA E BAIXO CÁVADO ATRAVÉS DA  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM ORIGEM NOS RESÍDUOS  
URBANOS

Mestrado  
Sistemas de Energias Renováveis

Dissertação efetuada sob a orientação do  
Professor Doutor Mário Russo

Fevereiro de 2016



**AUTOR:**

RUI MANUEL GONÇALVES FRANCO

---

**CONSTITUIÇÃO DO JÚRI**

---

**PRESIDENTE:** PROFESSORA DOUTORA PRECIOSA PIRES (ESTG-IPVC)

---

**VOGAL ARGUENTE:** PROFESSOR DOUTOR MÁRIO TOMÉ (ESTG-IPVC)

---

**VOGAL:** PROFESSOR DOUTOR MÁRIO RUSSO (ESTG-IPVC)



*“O séc. XIX foi o século do carvão, o  
séc. XX foi o século do petróleo, ...  
terá de surgir uma alternativa para  
sustentar a economia do séc. XXI.”*

*Tim Flannery em  
“We are the weather makers”*

## DEDICATÓRIA

À minha mulher, restante família e amigos.



## AGRADECIMENTOS

Quero aqui expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a concretização deste trabalho. Agradeço ao Professor Doutor Mário Russo a orientação, disponibilidade e abertura que ajudaram na realização deste trabalho. Quero deixar ainda registado um profundo agradecimento, ao Administrador da Resulima S.A., Eng<sup>o</sup> José Manuel Cardona a possibilidade de realizar este trabalho nas instalações da empresa, ao Eng<sup>o</sup> Francisco Alves, da mesma empresa, pelo apoio e seguimento em todas as fases de desenvolvimento do trabalho de campo, assim como ao Sr. Couto na colaboração em diversas medições e monitorizações realizadas no aterro sanitário (AS).

Aos restantes técnicos da Resulima, Eng<sup>o</sup> Araújo, Eng<sup>a</sup> Joana e a Sr.<sup>a</sup> Beatriz o apoio no fornecimentos de diversos elementos e registos do histórico da deposição de RU, operacionalização do AS, manutenção dos diversos equipamentos utilizados em toda a estrutura.

Um especial agradecimento, carinho e apreço, à minha mulher Elisabete, pelo apoio e compreensão ao longo de todo este trabalho. A todos os meus colegas de curso, principalmente ao Lorrán Leite, Timóteo Freitas, Ourania Klapa, André Barbosa, Bruno Barbosa, Joel Alves, Vanessa Múrias, Diogo Gomes, David Barbosa e Kevin Aleixo, pelas noitadas e fins de semana de estudos na ESTG/IPVC sem as quais dificilmente teria chegado até aqui.





## RESUMO

Tanto nas sociedades desenvolvidas como nas em vias de desenvolvimento tem-se verificado um aumento significativo do consumo energético o que, associado aos atuais esforços para diminuir a emissão de gases com efeito de estufa e garantir uma menor dependência dos combustíveis fósseis, conduziu ao aumento da procura de fontes de energia renováveis. Por outro lado, a produção de resíduos urbanos é exponencial e os problemas que acarretam são igualmente enormes, desde logo pela incorreta forma da sua disposição final em mais de 50% das situações a nível mundial. Por outro lado, existem muitos recursos disponíveis nos resíduos urbanos que devem ser valorizados, designadamente o energético.

O presente trabalho visa contribuir para uma melhor compreensão da valorização energética do biogás produzido num aterro sanitário, tendo sido estudado o caso do aterro da empresa multimunicipal RESULIMA.SA, em Viana do Castelo. Para o efeito, foram utilizadas medições de vários parâmetros inerentes à produção do biogás ao longo do tempo, às caracterizações dos resíduos depositados, às quantidades depositadas desde o início à atualidade e ao seu volume em aterro. Para uma melhor compreensão ao longo de mais de 17 anos da deposição de resíduos urbanos, foi realizada uma modelação do aterro sanitário a três dimensões (3D). Com base no trabalho realizado, além da inclusão da modelação tridimensional, foi feita uma estimativa da produção de biogás no aterro, comparada com o que as medições locais indicam para avaliar o próprio modelo de previsão de produção e o biogás eventualmente libertado para a atmosfera através da cobertura do aterro, fora do raio de influência e captação dos poços de desgaseificação do biogás.

Foi feita uma análise de sensibilidade em função da taxa de atualização e do preço da energia elétrica, podendo-se concluir que, por exemplo, em Portugal o investimento nos sistemas de produção de biogás é, em geral, economicamente viável, variando o tempo de retorno do investimento entre 7 e 12 anos. Por outro lado, estes sistemas também podem ser economicamente viáveis em países em vias de desenvolvimento, particularmente quando instalados para produzir de forma combinada biogás e energia

elétrica em zonas remotas sem acesso à rede elétrica pública. Para que haja viabilidade econômica, nas condições simuladas, estima-se que a quantidade mínima de resíduos é de 200 ton/dia. Do trabalho emerge a conclusão preliminar que o aterro possui um bom aproveitamento energético, tendo inclusive sido penalizado por o biogás não ter sido aproveitado desde o início da sua produção economicamente viável, que foi ao fim de 2 anos de exploração. Atualmente o sistema tem funcionado à potência máxima de produção, cerca de 80 GWh, após quase cinco anos de funcionamento.

Palavras-chave: aterro sanitário, resíduos, biogás, valorização energética.

## ABSTRACT

Both in developed societies as in developing countries there has been a significant increase in energy consumption which, combined with ongoing efforts to reduce the emission of greenhouse effect and ensure less dependence on fossil fuels, has led to increased demand for renewable energy sources. On the other hand, the production of municipal waste is exponential and the problems they entail are also huge, since early in the incorrect manner of their disposal in more than 50% of cases worldwide. On the other hand, there are many resources available in municipal waste to be recovered, namely energy.

This paper aims to contribute to a better understanding of energy recovery of biogas produced in the landfill, has been studying the case of the multi-municipal landfill company RESULIMA.SA, in Viana do Castelo. For this purpose, measurements of various parameters associated with the production of biogas over time were used, the characterization of the waste deposited, the amounts deposited from the beginning to the present time and its volume in a landfill. For a better understanding over more than 17 years of deposition of municipal waste a modelling landfill in three dimensions was made (3D). Based on the work accomplished, apart from the inclusion of three-dimensional modelling an estimate of biogas production in the landfill has been made, compared with the local measurements indicate to evaluate the own model of production forecast and biogas may be released to the atmosphere through coverage of the landfill, outside the radius of influence and capture of biogas degasification wells.

A sensitivity analysis on the basis of the refresh rate and the price of electricity has been made, may be concluded that, for example, Portugal investment in biogas systems is generally economically feasible, by varying the time of return on investment between 7 and 12 years. On the other hand, these systems can also be economically viable in developing countries, particularly when installed to produce a combined biogas and electricity in remote areas without access to the public power grid form. For there to be economically viable, the simulated conditions, it is estimated that the minimum amount of waste is 200 ton/day. Work emerges the preliminary conclusion that the landfill has a good energy use, including having been penalized for biogas have not been tapped since the beginning of its economically viable production, which

was after 2 years of operation. Currently, the system has been operating at maximum power production, about 80 GWh, after nearly five years of operation.

Keywords: landfill, waste, biogas, energy recovery.

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	ENQUADRAMENTO GERAL DO TEMA .....	3
1.1.1	ENQUADRAMENTO LEGAL .....	4
1.2	OBJETIVOS.....	5
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1	FORMAÇÃO E PRODUÇÃO DO BIOGÁS .....	10
2.2	CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS EM ATERROS .....	11
2.3	PROCESSOS .....	13
2.4	COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	15
2.5	FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DO BIOGÁS .....	17
2.5.1	COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS.....	18
2.5.2	A HUMIDADE DOS RESÍDUOS.....	18
2.5.3	TAMANHO DAS PARTÍCULAS .....	20
2.5.4	MODELAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	20
2.5.5	ODORES.....	21
2.5.6	EMISSÕES DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA (GEE) .....	21
2.5.7	RISCOS PARA A SAÚDE E EFEITOS TÓXICOS .....	21
2.5.8	EXPLOSÕES .....	22
2.5.9	STRESS DA VEGETAÇÃO .....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
3.1	LOCAL DE ESTUDO.....	24
3.1.1	INFRAESTRUTURA DO ASVC.....	27
3.1.2	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS .....	30
3.2	ASPETOS CONSTRUTIVOS DA REDE DE BIOGÁS DO ASVC .....	31
3.2.1	REDE EXTERIOR DO BIOGÁS .....	31
3.2.2	REDE INTERIOR DO BIOGÁS.....	36
3.3	MONITORIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ASVC.....	40

3.4	METODOLOGIA DA MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS NO ASVC .....	42
3.5	CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS DE MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS.....	42
3.6	VERIFICAÇÃO INICIAL DO MEDIDOR .....	43
3.7	MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS NOS POÇOS.....	44
3.8	MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS NA CONDUTA PRINCIPAL DO CEP . .....	48
3.9	DETERMINAÇÃO DA ABERTURA DA VÁLVULA DE RAMAL EM CADA POÇO DE BIOGÁS.....	49
3.10	BOAS PRÁTICAS NA MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS.....	53
3.11	MONITORIZAÇÃO DA DEPRESSÃO DO BIOGÁS DO ASVC .....	53
3.12	METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES DA DEPRESSÃO DO BIOGÁS NO ASVC .....	53
3.13	MONITORIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO BIOGÁS DO ASVC .....	54
3.14	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO BIOGÁS .....	55
3.15	O CENTRO ELETROPRODUTOR (CEP) DO ASVC.....	56
3.15.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	56
3.15.2	MANUTENÇÃO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA .....	57
3.15.3	CARACTERIZAÇÃO DO CEP .....	58
3.15.4	UNIDADE DE PRE-TRATAMENTO (DESUMIDIFICAÇÃO) DO BIOGÁS .....	62
3.16	METODOLOGIA DA MODELAÇÃO (3D) DA CELULA DE DEPOSIÇÃO.....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
4.1	MODELAÇÃO TRIDIMENSIONAL DA CÉLULA DE DEPOSIÇÃO .....	65
4.2	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS .....	68
4.3	CARACTERIZAÇÃO E ESTIMATIVA DOS RESÍDUOS SEGUNDO O MODELO DO IPCC.....	74
4.4	RESULTADOS GLOBAIS DA QUALIDADE DO BIOGÁS.....	76
4.5	ANÁLISE DOS DADOS DE QUALIDADE DE BIOGÁS EM CADA POÇO .....	78
4.6	RESULTADOS DA CAMPANHA DE PRESSÃO DO BIOGÁS DE MEDIÇÃO .	79
4.7	ANÁLISE DOS DADOS DE DEPRESSÃO .....	79
4.8	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA TEMPERATURA DO BIOGÁS .....	79
4.9	ANÁLISE DOS DADOS DE TEMPERATURA.....	80
4.10	PRODUÇÃO DE ENERGIA VS CUSTOS DE MANUTENÇÃO .....	80

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>85</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>





## ÍNDICE DAS FIGURAS

FIGURA 2-1 - ESQUEMA DAS FRONTEIRAS NUM ATERRO SANITÁRIO.....	7
FIGURA 2-2 - ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO. ....	9
FIGURA 2-3 - FASES DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO.....	13
FIGURA 2-4 - CURVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO.....	15
FIGURA 2-5 - PERFIS TÍPICOS PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	19
FIGURA 2-6 - LIMITES DE EXPLOSIVIDADE DO METANO.....	22
FIGURA 3-1- MUNICÍPIOS QUE INTEGRAM O SISTEMA MULTIMUNICIPAL DO VALE DO LIMA E BAIXO CÁVADO. ....	24
FIGURA 3-2 - DISPOSIÇÃO GEOGRÁFICA DO ASVC. ....	25
FIGURA 3-3 - MODELO TÉCNICO DA RESULIMA.....	27
FIGURA 3-4 - LOCALIZAÇÕES DAS PRINCIPAIS INFRAESTRUTURAS DO ASVC. ....	29
FIGURA 3-5 - CICLO DO RESÍDUO URBANO.....	30
FIGURA 3-6 - REDE DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS DO ASVC. ....	32
FIGURA 3-7 - DIVERSAS CABEÇAS DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS DO ASVC. ....	32
FIGURA 3-8 - CONDUTA PERIFÉRICA DO BIOGÁS NO ASVC.....	33
FIGURA 3-9 - EXEMPLO DA VÁLVULA DE RAMAL.....	34
FIGURA 3-10 - EXEMPLO DA VÁLVULA DE MEDIÇÃO PRÓXIMO DA VÁLVULA DE RAMAL.....	34
FIGURA 3-11 - POSICIONAMENTO DAS CONDUTAS SECUNDÁRIAS DE BIOGÁS NO ASVC.....	35
FIGURA 3-12- CONDUTAS RANHURADAS UTILIZADAS PARA IMPLEMENTAR OS POÇOS VERTICAIS DE BIOGÁS. ....	37
FIGURA 3-13 - MATERIAL DRENANTE UTILIZADO NO ASVC. ....	37
FIGURA 3-14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REDE E VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS. ....	38
FIGURA 3-15 - PARQUE DE TERRA DO ASVC ATRÁS DAS LAGOAS DE REGULARIZAÇÃO. ....	40
FIGURA 3-16 - MEDIDOR DE BIOGÁS MÓVEL COM A VARETA DE MEDIÇÃO UTILIZADO NA RESULIMA.....	42
FIGURA 3-17 - VISTA DO TECLADO E DO VISOR DO ANALISADOR DE GASES. ....	43
FIGURA 3-18 - VISTA DO ANALISADOR DE GASES RECENTEMENTE ADQUIRIDO PELA ESTG.43	
FIGURA 3-19 - BOMBA PARADA (VISUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> E N <sub>2</sub> ).....	43
FIGURA 3-20- BOMBA FUNCIONAR .....	43
FIGURA 3-21- PARÂMETRO H <sub>2</sub> S.....	43
FIGURA 3-22 - MENSAGEM INICIAL DO ANALISADOR DE GÁS APÓS O ARRANQUE. ....	44
FIGURA 3-23 - COMPOSIÇÃO DO AR AMBIENTE DURANTE A CALIBRAÇÃO INICIAL DO	

ANALISADOR DE GÁS.....	44
FIGURA 3-24 - IDENTIFICAÇÃO DO POÇO DE BIOGÁS. ....	45
FIGURA 3-25 - LOCALIZAÇÃO DA VÁLVULA DE MEDIÇÃO .....	45
FIGURA 3-26 - COLOCAÇÃO ACOPLAMENTO ESTANQUE. ....	45
FIGURA 3-27 - INSERÇÃO DA VARETA DE MEDIÇÃO DO ANALISADOR DE BIOGÁS.....	46
FIGURA 3-28 - FOLHA DE REGISTO COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS. ....	47
FIGURA 3-29 - EXTRAÇÃO DA VARETA DE MEDIÇÃO DO ANALISADOR DE BIOGÁS.....	47
FIGURA 3-30 - RETIRAR A VARETA DE MEDIÇÃO E REMOVER O ACOPLAMENTO ESTANQUE. ....	47
FIGURA 3-31 - RECOLOCAÇÃO DO TAMPÃO DA VÁLVULA DE MEDIÇÃO.....	47
FIGURA 3-32 - REGULAÇÃO DA VÁLVULA DE RAMAL.....	48
FIGURA 3-33 VÁLVULA À ENTRADA DA CONDUTA NO CEP / QUEIMADOR. ....	48
FIGURA 3-34- ACOPLAMENTO INTERMÉDIO PARA MEDIR A CONCENTRAÇÃO DO BIOGÁS NA CONDUTA DO CEP. ....	49
FIGURA 3-35- VARETA DE MEDIÇÃO INTRODUZIDA NA CONDUTA DO CEP PARA MEDIR A CONCENTRAÇÃO DO BIOGÁS. ....	49
FIGURA 3-36 - DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ABERTURA NUMA VÁLVULA DE RAMAL.....	50
FIGURA 3-37 - VÁLVULA DE RAMAL FECHADA (0%).....	50
FIGURA 3-38 - VÁLVULA DE RAMAL PARCIALMENTE ABERTA (50%).....	50
FIGURA 3-39 - VÁLVULA DE RAMAL TOTALMENTE ABERTA (100%).....	51
FIGURA 3-40 - MANÓMETRO PARA MEDIR A DEPRESSÃO DO BIOGÁS.....	54
FIGURA 3-41- COLOCAÇÃO DO MANÓMETRO. ....	54
FIGURA 3-42 - ABERTURA DA VÁLVULA PARA MEDIÇÃO DA DEPRESSÃO. ....	54
FIGURA 3-43 - ADAPTADOR DE CORTIÇA PARA A MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO BIOGÁS NOS POÇOS DO ASVC. ....	55
FIGURA 3-44- COLOCAÇÃO DO ADAPTADOR DO SENSOR DE TEMPERATURA. ....	56
FIGURA 3-45 - ABERTURA DA VÁLVULA DE MEDIÇÃO.....	56
FIGURA 3-46 - MEDIÇÃO E VALIDAÇÃO DO RESULTADO.....	56
FIGURA 3-47 – MAQUETE DO CEP.....	56
FIGURA 3-48 - VISTA DOS DOIS CONTENTORES ONDE ESTÃO INSTALADOS OS MTG (CONTENTOR DA ESQUERDA, 800 kW E O CONTENTOR DA DIREITA, 1200 kW). ....	59
FIGURA 3-49 - VISTA DO MTG 1200 kW. ....	59
FIGURA 3-50 - QUADRO ELÉTRICO (QE) DE CONTROLO DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE DO MTGNº1.....	60

FIGURA 3-51 -- QUEIMADOR ASSOCIADO AO CEP. ....	61
FIGURA 3-52 - UNIDADE DE DESUMIDIFICAÇÃO (PRÉ-SECAGEM DO BIOGÁS. ....	63
FIGURA 4-1 – VISTA 3D DA CÉLULA DE DEPOSIÇÃO RU VAZIA DO ASVC. ....	65
FIGURA 4-2 - VISTA 3D DO LEVANTAMENTO EXECUTADO PELA ESTAÇÃO TOTAL LEYCA GEOSYSTEMS TPRS 1200. ....	65
FIGURA 4-3 - DETALHE DA MALHA PLANAR TRIANGULAR DO ASVC DA SUPERFÍCIE FORNECIDA PELA ESTAÇÃO TOTAL “LEYCA GEOSYSTEMS” ....	66
FIGURA 4-4 – DETALHE DA MALHA TETRAÉDRICA DO ASVC DA SUPERFÍCIE MODELADA 3D. .....	66
FIGURA 4-5 - VISTA 3D DA DEPOSIÇÃO DE RU REFERENTE AO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO, EM 05/07/2015. ....	66
FIGURA 4-6 - EVOLUÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE RU NO ASVC REFERENTE AOS DOIS ÚLTIMOS LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS. ....	67
FIGURA 4-7 – RESUMO SOBRE A UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE "LANDGEM". ....	68
FIGURA 4-8 - INTRODUÇÃO DE DADOS SOBRE AS CARATERÍSTICAS DO ATERRO. ....	69
FIGURA 4-9 - INTRODUÇÃO DE DADOS SOBRE OS PARÂMETROS DA MODELAÇÃO DO ATERRO. .....	70
FIGURA 4-10 - INTRODUÇÃO DOS GASES NA MODELAÇÃO. ....	71
FIGURA 4-11 - FOLHA DE CÁLCULO "USER INPUTS". ....	73
FIGURA 4-12 - CARATERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS PRODUZIDOS EM 2014. ....	75
FIGURA 4-13 - RESUMOS DOS DADOS OBTIDOS A PARTIR DO MODELO DO IPCC. ....	76
FIGURA 4-14 - EVOLUÇÃO DURANTE O SEGUNDO TRIMESTRE DE 2015 DO CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> E H <sub>2</sub> S .....	77
FIGURA 4-15 - EVOLUÇÃO DURANTE O SEGUNDO TRIMESTRE DE 2015 DO O <sub>2</sub> E N <sub>2</sub> NA ENTRADA DO CEP. ....	77
FIGURA 4-16 - ENERGIA VENDIDA AO SERVIÇO ELÉTRICO PÚBLICO (SEP). ....	81
FIGURA 4-17- DISPONIBILIDADE DOS MOTOGERADORES EM 2014. ....	81
FIGURA 4-18 - FATURAÇÃO VS CUSTOS DE MANUTENÇÃO. ....	82



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1 - REQUISITOS MÍNIMOS PARA AT, EM FUNÇÃO DA CATEGORIA.....	10
TABELA 2-2 - CONSTITUIÇÃO TÍPICA DO BIOGÁS.....	15
TABELA 2-3 - CONTEÚDO DE SATURAÇÃO DE H <sub>2</sub> O DE LFG À PRESSÃO AMBIENTE.....	16
TABELA 2-4 - PRINCIPAIS FATORES INTERVENIENTES NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE GASES.....	18
TABELA 3-1 - LOCALIZAÇÃO DAS LIXEIRAS ENCERRADAS NO SMM COM A CRIAÇÃO DO ASVC.....	25
TABELA 3-2 - INDICADORES DEMOGRÁFICOS DA RESULIMA.....	26
TABELA 3-3 - RESUMO PARA A AVALIAR QUAL A PERCENTAGEM DE ABERTURA A APLICAR NA VÁLVULA DE RAMAL DO POÇO EM ESTUDO.....	51
TABELA 3-4 – RESUMO DOS DANOS CAUSADOS NOS EQUIPAMENTOS EM FUNÇÃO DE CADA PARÂMETRO DO BIOGÁS.....	58
TABELA 3-5 - CARATERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPAIS DOS MOTOGERADORES DO CEP DO ASVC.....	60
TABELA 3-6 - MOTORES A BIOGÁS MWM EM FUNCIONAMENTO NO CEP.....	62
TABELA 4-1- VOLUME REAL DE COMPACTAÇÃO DE RU NO ASVC.....	67
TABELA 4-2 - MASSA DE RU DEPOSITADOS NO ASVC.....	72
TABELA 4-3 – RESULTADOS REFERENTES AO BIOGÁS GERADO NO ATERRO DE VIANA DO CASTELO.....	74
TABELA 4-4 - RESULTADOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO DA DEPRESSÃO DE BIOGÁS NOS POÇOS DO ASVC.....	79
TABELA 4-5 - RESUMO DOS RESULTADOS REFERENTE POSIÇÕES DAS VÁLVULAS DE RAMAIS E DAS RESPETIVAS DEPRESSÕES DEPOIS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO DO 08/06/2015.....	79
TABELA 4-6 - RESULTADOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO BIOGÁS NO ASVC REALIZADO NO DIA 11/06/2015.....	80



## SIGLAS E ABREVIATURAS

- **2D**: duas dimensões;
- **3D**: três dimensões;
- **AIA**: Avaliação de Impacto Ambiental;
- **AT**: Aterro;
- **AS**: Aterro Sanitário;
- **ASVC**: Aterro Sanitário do Vale de Lima e Baixo Cávado;
- **CH<sub>4</sub>**: metano;
- **CO<sub>2</sub>**: Dióxido de carbono;
- **COD**: Carbono orgânico degradável;
- **CEP**: Centro Eletroprodutor;
- **EGF**: Empresa Geral do Fomento;
- **ESTG**: Escola Superior de Tecnologia e Gestão;
- **ETAL**: Estação de Tratamentos de Águas Lixivantes;
- **H<sub>2</sub>S**: Ácido sulfídrico ou sulfeto de hidrogénio;
- **IPVC**: Instituto Politécnico de Viana do Castelo;
- **LFG**: Landfill gas
- **LandGEM**: Landfill Gas Emission Model;
- **LIE**: Limite inferior de explosividade;
- **LT**: Levantamento Topográfico
- **MTG**: Motogerador;
- **MWM**: Motoren-Werke Mannheim;
- **NMOC**: Non-Methane Organic Compoud;
- **O<sub>2</sub>**: Oxigénio;
- **PCIP**: Prevenção e Controlo Integrados da Poluição;
- **PEAD**: Polietileno de Alta Densidade;
- **PERSU**: Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos;
- **pH**: potencial de hidrogénio;
- **PNAEE**: Plano Nacional Ação para Eficiência Energética;
- **RCD**: Resíduos de construção e demolição;
- **REEE**: Resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos;
- **RU**: Resíduos Urbanos;
- **SMM**: Sistema multimunicipal





## 1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas e a dependência energética são atualmente dois grandes problemas que estão no centro das preocupações de todos os países e que tem motivado acesas discussões sobre o modo como mitigar os seus efeitos. Dentre as causas das disfunções que concorrem para as alterações climáticas estão as emissões gasosas para a atmosfera, concorrendo para o aumento da temperatura e consequências adversas já conhecidas, sendo os resíduos mal geridos um dos principais contribuintes com emissões com efeito de estufa através do biogás produzido em soluções de aterramento dos resíduos, maioritariamente em lixeiras sem qualquer tipo de controlo. Assim, a correta gestão dos resíduos urbanos (RU) desempenha um papel primordial neste contexto e por isso está cada vez mais presente na agenda de preocupações das entidades responsáveis diretamente pelo seu equacionamento ambientalmente correto, conforme estipulado pela legislação nacional e comunitária.

Os resíduos, durante décadas foram encarados como algo sem valor e alvo de parca atenção. A produção era escassa e maioritariamente orgânica com soluções locais na criação de animais domésticos ou de abate. No entanto, quando eram produzidos em aglomerados populacionais, como vilas e cidades sem serviços urbanos estabelecidos, concorreram para a falta de salubridade e agravamento da saúde pública, nomeadamente pestes com consequências nefastas para a população. Este paradigma porém viria a modificar-se, sobretudo após a grande conferência mundial sobre o clima, a Cimeira da Terra, no Rio de Janeiro, em 1992. Em Portugal, o panorama começou a alterar-se com o estabelecimento de um Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), aprovado em 1997 e apoiado com fundos de coesão da União Europeia (UE). Com efeito, em 1996 existiam 341 lixeiras ativas no país, que fruto do referido plano foram erradicadas até 2002 e os resíduos urbanos passaram a ser encaminhados para as atuais 23 unidades de gestão entretanto criadas ao abrigo do mesmo Plano, maioritariamente depositados em aterros sanitários, mas também destinados à valorização energética e com efeito, a composição gravimétrica dos RU mostra-nos uma fração elevada de material orgânico que em ambiente anaeróbio (aterro sanitário) é responsável pela formação de biogás, o qual, ao ser drenado é utilizado como combustível para alimentar motogeradores

que produzem eletricidade injetada na rede elétrica nacional.

Atualmente, os 12 municípios do Alto Minho e Baixo Cávado estão associados em duas entidades gestoras de resíduos onde é procedido o seu tratamento e valorização, através de duas entidades:

- A RESULIMA - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA;
- A VALORMINHO – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, SA.

O presente trabalho pretende constituir um contributo para determinar os fatores mais importantes a levar em consideração para uma correta valorização energética de biogás produzido num aterro sanitário (AS), em particular na RESULIMA. Desta forma, foi levado em consideração os diversos fatores que abrangem a produção e valorização do biogás, designadamente a característica dos resíduos depositados, a sua quantidade e a volumetria que os mesmos ocupam no aterro ao longo do tempo. Através dos diversos levantamentos topográficos foi possível construir um modelo tridimensional que mostra a evolução do AS desde Janeiro/2015 até ao presente momento. Assim, foi necessário obter a informação sobre a evolução do AS, a caracterização dos RU da RESULIMA, a rede de biogás no AS e ainda a real capacidade de produção do biogás no AS através das medições efetuadas com regularidade e os resultados das diversas campanhas de campo.

A modelação tridimensional foi realizada com base nos levantamentos topográficos a 3D do aterro, de forma a visualizar o crescimento e antiguidade das diversas camadas de resíduos depositados. Esta tarefa foi realizada através da utilização de diversos softwares, nomeadamente para a previsão e gestão do biogás, foi utilizado o LandGEM 3.1 da USEPA com parâmetros locais e uma versão personalizada para a empresa do StatPlanet, bem como o Autocad 2015, Inventor Professional 2015, Rhinoceros e Archicad 19.

No decurso do presente trabalho foram realizadas três intervenções nos dois motogeradores (800 e 1200 KW) no cumprimento dos planos de manutenção preventivos definidos que evidenciaram a necessidade dos queimadores de biogás como fusíveis para o excesso de biogás produzido e não utilizado. A temática dos motores e do seu funcionamento, do seu desgaste provocado pelo biogás não sofrer qualquer tipo de tratamento prévio será objeto de abordagem futura.

## 1.1 ENQUADRAMENTO GERAL DO TEMA

A adoção de políticas de regulamentação e gestão no que se refere à prevenção, valorização, tratamento e destino final dos resíduos tem vindo a crescer com alguma rapidez nas últimas décadas, em grande parte devido à influência de políticas europeias. Em Portugal, o Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU) foi o primeiro plano aprovado em 1997 e configurou-se como um documento de referência na área dos resíduos urbanos. Este veio ditar a criação de sistemas multimunicipais e intermunicipais de gestão de RU com responsabilidades pelo encerramento das lixeiras e pela construção de infraestruturas de valorização, tratamento e eliminação de resíduos urbanos e incremento da recolha seletiva multimaterial.

O PERSU estabeleceu ainda linhas de orientação geral para a criação dos fluxos especiais de resíduos, abrindo caminho à criação de legislação específica e à constituição e licenciamento das respetivas entidades gestoras. O impacto deste plano foi bastante positivo uma vez que em 2002 já se tinham encerrado todas as lixeiras e os resíduos já estavam a ser geridos de forma controlada. Tendo expirado o período inicialmente estipulado para o cumprimento das metas definidas, foi necessário proceder-se à revisão do Plano, o que veio a acontecer com o PERSU II (2007-2016). O PERSU II tentou corrigir o que não foi alcançado no PERSU e estabelece as novas prioridades a observar no domínio da gestão dos RU, face às metas a atingir fruto das imposições da legislação da UE, estabelecendo novas ações a implementar e a obrigatoriedade dos municípios e as entidades gestoras (EG) definirem os respetivos Planos de ação.

O PERSU II definiu linhas para a hierarquização das operações de gestão de resíduos tendo sempre como objetivo a utilização dos resíduos como recursos, sendo que o objetivo final seria a minimização da deposição em aterro. Porém, em Portugal Continental, a deposição em aterro ainda ocupa uma grande percentagem do destino final dos resíduos, sendo ali depositados cerca de 53,6% dos resíduos urbanos. Dos restantes, cerca de 18,2% são valorizados energeticamente, 15,7% são valorizados organicamente e 12,7% são reciclados com valorização multimaterial.

A utilização e aposta nos recursos renováveis constitui uma resposta à dependência energética de Portugal relativamente ao exterior, sendo que atualmente, o setor dos transportes é o que mais depende de combustíveis fósseis. Em 2012, Portugal apresentou valores de dependência ligeiramente superiores a 2011 (79,8% contra os 79,3%). Os objetivos traçados para este setor centram-se na diversificação das fontes primárias de energia e no aumento da eficiência energética do país. Para colmatar e tentar cumprir os objetivos traçados, a Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, de 10 de Abril, aprovou o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 (Estratégia para a Eficiência Energética – PNAEE 2016) e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis para o período 2013-2020 (Estratégia para as Energias Renováveis - PNAER 2020).

Sendo os resíduos urbanos um recurso relevante para a produção de energia, optou-se por fazer uma análise do potencial deste mesmo recurso tendo como horizonte de análise o ano de 2020.

#### 1.1.1 ENQUADRAMENTO LEGAL

Relativamente à deposição de resíduos em aterro existe uma diretiva europeia, a Diretiva 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril de 1999, representando assim a principal referência legal nesta matéria. Esta foi transposta para o Decreto-Lei n.º 152/2002, de 23 de Maio, revogado pelo Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto, com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 84/2011, de 20 de Junho que tem por objetivo evitar ou reduzir os efeitos negativos sobre o ambiente da deposição de resíduos em aterro, quer à escala local, em especial a poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e da atmosfera, quer à escala global, em particular o efeito de estufa, bem como quaisquer riscos para a saúde humana. Para efeitos da redução dos resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterro são fixados os seguintes objetivos:

- a) Até Julho de 2013, os resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterro devem ser reduzidos para 50% da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995;
- b) Até Julho de 2020, os resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterro devem ser reduzidos para 35 % da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995.

Os aterros têm ainda de cumprir as exigências impostas no Decreto-Lei n.º 69/2000 de 3 de Maio, relativo à Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), Decreto-Lei n.º 173/2008 de 26 de Agosto, relativo à prevenção e controlo integrados da poluição (PCIP) e o Decreto-Lei n.º 147/2008 de 29 de Julho, relativo à responsabilidade por danos ambientais.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar um levantamento do potencial e valorização energética do biogás produzido no aterro sanitário da RESULIMA (ASVC) com origem no tratamento dos RU e a avaliação ambiental da sua exploração; modelação tridimensional do aterro com vista à calibração do modelo de previsão de produção de biogás para apoio à decisão de investimentos na produção de energia renovável a partir do biogás produzido.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho subdivide-se em sete capítulos. O primeiro capítulo remete à introdução na qual se faz uma abordagem global ao tema, sendo abordado todo o enquadramento legal e objetivos gerais associados a este trabalho. No segundo capítulo é referido o estado da arte relativamente aos aterros sanitários e composição dos mesmos, nomeadamente a infraestrutura e enquadramento do ASVC, bem como a caracterização dos resíduos sólidos urbanos, mediante as suas características e classificação onde se encontram inseridas as vantagens e desvantagens do biogás, os fatores que influenciam a formação e produção do biogás. O terceiro capítulo engloba a temática das metodologias e materiais associados à produção de biogás. É demonstrado através de um software de previsão de produção dos gases de aterro, apresentando toda a nomenclatura e formulação matemática de cálculo estimativo relativamente ao aproveitamento energético do biogás e o potencial da valorização do mesmo. Além disso, são mencionadas aspetos construtivos da rede de biogás no ASVC e toda a temática relacionada com a monitorização do biogás. No quarto capítulo são apresentados os dados utilizados e os resultados obtidos. O quinto capítulo desta dissertação enumera concretamente as conclusões e recomendações de diversos trabalhos futuros, desde o Centro Eletroprodutor do ASVC que foi

considerada durante este trabalho por forma a continuar a evoluir esta temática. No sexto capítulo apresenta – se a bibliografia. Por fim, no sétimo capítulo engloba os anexos dos levantamentos topográficos de apoio à modelação tridimensional e os gráficos da qualidade do biogás nos 31 poços monitorizados entre 27/01/2015 e 07/06/2015.

## 2 ESTADO DA ARTE

Tanto a legislação comunitária como a legislação portuguesa denomina de aterro um conjunto de instalações de receção, de tratamento e de deposição de resíduos a um nível inferior à superfície natural do local de aterro. Ao mesmo tempo, um aterro é considerado um destino final para os resíduos que não reúnam nenhum tipo de potencialidade valorativa, seja essa valorização orgânica, energética ou reciclagem.

Uma solução para as antigas lixeiras a céu aberto que se encontravam no território nacional foi a construção dos aterros sanitários. Contudo, graças à necessidade imperiosa de limitar os efeitos nefastos para o meio ambiente, os aterros sanitários apresentam um conjunto de barreiras físicas consecutivas que funcionam como fronteiras à dispersão microbiológica e contaminação dos solos envolventes. A figura 2-1 apresenta o esquema dessas fronteiras.

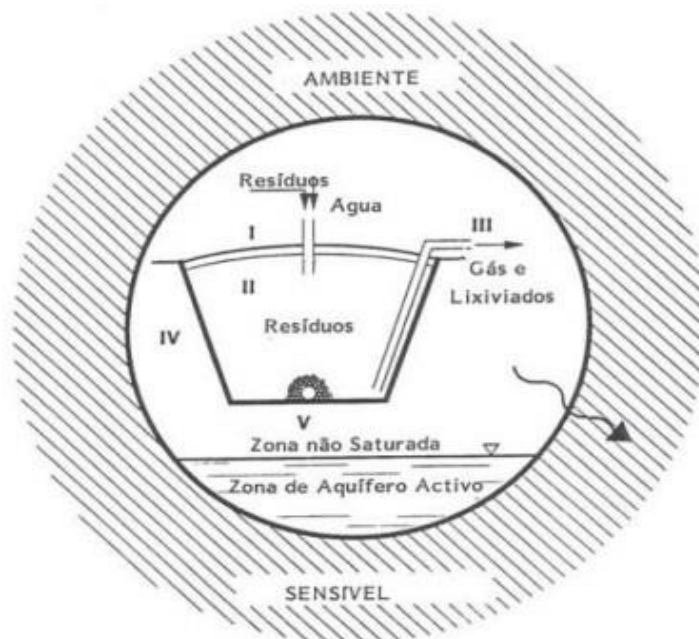


Figura 2-1 - Esquema das fronteiras num aterro sanitário.  
Fonte: (Russo, 2005).

A barreira I representa o principal ponto de introdução de resíduos e de água. Visualmente, esta barreira figura-se uma tela de cobertura da superfície da zona de aterro. O controlo de entrada dos constituintes mencionados rege-se mediante sistemas operacionais de drenagem de gases e de águas pluviais, de circulação de

lixiviados, de fatores influenciadores na degradação biológica.

A barreira II representa todo o espaço físico onde ocorre a degradação da matéria orgânica constituinte dos resíduos depositados, produção e circulação de gases e lixiviados.

A barreira III compreende todo o sistema de captação de gases produzidos durante a degradação anaeróbia da matéria orgânica constituinte dos resíduos, bem como o sistema de recolha de lixiviados que circulam por entre a matéria degradada.

À cota mínima do aterro encontra-se a barreira IV. Nesta fronteira a impermeabilização dos alvéolos do aterro em relação ao solo é fundamental. Geralmente a constituição desta barreira resume-se a uma camada simples de geomembrana e solo argiloso.

Na barreira V é a estrutura geológica onde assenta o aterro sanitário. Esta estrutura possui camadas suplementares de defesa dos aquíferos potencialmente existentes. Segundo (Russo, 2005), a contaminação dos aquíferos e do solo é um dos principais objetivos de defesa no projeto e operação dos aterros sanitários. Evitar esta contaminação dos alvéolos através da sua impermeabilização é um dos fundamentos essenciais na proteção ambiental, pelo que esta segurança é denominada de segurança passiva. O outro sistema de segurança existente num aterro sanitário é a segurança ativa. Este sistema é constituído essencialmente por uma barreira geomembrana artificial de impermeabilização, um sistema de drenagem de águas pluviais, um sistema de drenagem e recolha de lixiviados e um sistema de recolha e tratamento de biogás. Na mesma ordem que a segurança passiva, a segurança ativa requer uma metodologia específica por forma a garantir um reduzido impacte ambiental e cumprimento das respetivas normas e legislação. Nesse sentido, é fundamental:

- Controlar a infiltração de águas pluviais, superficiais ou subterrâneas no interior dos alvéolos do aterro sanitário;
- Captar e tratar as águas contaminadas e lixiviados, garantindo níveis mínimos destes fluidos no interior do aterro e cumprimentos das normas relativas à descarga;
- Captar e tratar o biogás produzido, sendo que este permite valorização.

De acordo com (Montilha, 2005), as bactérias anaeróbias existentes na massa de



resíduos depositados são responsáveis pela conversão dos resíduos orgânicos em ácidos orgânicos e consequentemente em metano e dióxido de carbono. A ausência de oxigênio, isto é condições anaeróbias, desenvolvem-se naturalmente após a deposição e cobertura dos resíduos sem que seja imperioso qualquer tipo de intervenção. A otimização das condições anaeróbias para a degradação biológica implica diversos fatores sendo o teor de humidade um dos mais relevantes.

De acordo com (Russo, 2005), quando o aterro está localizado em regiões com déficit hídrico, permanente ou temporário, e as condições de estabilidade o permitem, pode e deve utilizar-se o lixiviado recolhido para fazer a recirculação de modo a manter a humidade em níveis necessários à degradação anaeróbia. Por esta razão, fontes adicionais de humidade podem ser utilizadas, nomeadamente, lamas de águas residuais domésticas podem posteriormente ser necessários para aumentar o lixiviado disponível para recirculação. O lixiviado é captado recorrendo a um sistema de drenagem de fundo do aterro e é canalizado para uma instalação local para o seu tratamento. Esta intervenção permite um aumento da massa volúmica dos resíduos, das taxas de degradação dos resíduos, da quantidade de gases produzidos e redução do tempo de degradação. Devido a esta produção acelerada, os sistemas de captação de gases nos aterros devem ser capazes de suportar um pico de volume alto num curto período de tempo (Russo, 2005). Na figura 2-2 é apresentada uma vista em corte de um aterro com funcionamento operático do tipo bioreactor anaeróbio.



*Figura 2-2 - Esquema de construção e operação de um aterro sanitário.*  
Fonte: (Adaptado de Dubois e Mercier, 2009).

Os aterros sanitários, de acordo com a legislação Europeia e portuguesa, podem ser classificados em função da característica dos resíduos que podem receber, podendo ser, por isso:

- Aterros para resíduos inertes;
- Aterros para resíduos não perigosos (que se inclui os resíduos urbanos);
- Aterros para resíduos perigosos.

Apresenta-se na tabela 2-1 os requisitos que devem possuir os aterros, de acordo com a legislação nacional (Decreto Lei nº 183/2009) e comunitária (Diretiva aterros).

*Tabela 2-1 - Requisitos mínimos para AT, em função da categoria.*

Categoria do aterro	Resíduos inertes	Resíduos não perigosos	Resíduos perigosos
Sistema de protecção ambiental passiva:			
Barreira de segurança passiva .....	Sim .....	Sim .....	Sim.
Sistema de protecção ambiental activa:			
Barreira de impermeabilização artificial .....		Sim .....	Sim.
Sistema de drenagem de águas pluviais .....		Sim .....	Sim.
Sistema de drenagem e recolha de lixiviados .....		Sim .....	Sim.
Sistema de drenagem e tratamento de biogás .....		(*)	(*)
Sistema de encerramento:			
Camada de drenagem de gases .....		(*)	(*)
Barreira de impermeabilização artificial .....			Sim.
Camada mineral impermeável .....		Sim .....	Sim.
Camada de drenagem > 0,5 m .....		Sim .....	Sim.
Cobertura final com material terroso > 1 m .....	Sim .....	Sim .....	Sim.
Instalações e infra-estruturas de apoio:			
Vedação .....	Sim .....	Sim .....	Sim.
Portão .....	Sim .....	Sim .....	Sim.
Vias de circulação .....	Sim .....	Sim .....	Sim.
Queimador de biogás .....		(*)	(*)

(\*) A definir em função do tipo de resíduos admitidos no aterro.

## 2.1 FORMAÇÃO E PRODUÇÃO DO BIOGÁS

A deposição de RU em aterros permite a formação do biogás, sendo este considerado uma fonte de energia renovável. A decomposição da matéria orgânica ocorre, em ambientes anaeróbios e húmidos, devido à presença de bactérias metanogénicas, que libertam como produto final da sua digestão, o metano, o qual, possui um elevado poder calorífico (PCI) o que torna viável a sua queima para a produção combinada de energia térmica e eléctrica. Como referido anteriormente, quando o biogás é libertado

diretamente para a atmosfera, o seu efeito é nocivo visto que, o metano apresenta um potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao dióxido de carbono. Assim, existem diversos fatores para a formação do biogás como a idade, composição, compactação e quantidade dos resíduos, bem como a humidade da mistura, o pH e alcalinidade, a existência de nutrientes, a toxicidade e a temperatura, entre outros. A penetração do ar apesar da sua relevância na formação do biogás é extremamente negativa na formação do biogás devido à presença das bactérias metanogênicas. Para se obter um aproveitamento mais eficiente do biogás produzido, a construção do aterro deve obedecer a certos parâmetros como sejam a estrutura do aterro, a colocação de drenos em cada camada de resíduos depositada e uma eficiente impermeabilização do aterro. Assim, a estrutura permite controlar e monitorizar a quantidade de resíduos depositados, sendo que a sua separação em alvéolos permite a exploração e valorização parcial do aterro sem que a sua capacidade global seja atingida. A instalação de drenos em cada camada permite reduzir o número de furos de captação do biogás. A correta impermeabilização possibilita as condições necessárias para a degradação da matéria orgânica e um aumento na produção do biogás. O solo colocado no topo das células não só tem a função de esconder os resíduos como, também serve para controlar o oxigénio e a infiltração da água protegendo assim o ambiente anaeróbio dentro da célula promovendo os processos microbianos (Manfredi, 2009).

Após o encerramento operacional do aterro sanitário, procede-se à sua cobertura final, podendo esta ser feita com impermeabilização total ou parcial, utilizando materiais sintéticos (geossintéticos) ou naturais (argilas) ou adotando uma solução híbrida, que garanta entradas controladas de humidade para a massa de resíduos. Nesta fase, que pode levar vários anos, a legislação obriga o estabelecimento de um programa de monitorização válido por 30 anos após o encerramento, para se proceder à avaliação do progresso verificado na estabilização da massa de resíduos (Russo, 2005).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS EM ATERROS

O biogás proveniente de aterros apresenta as seguintes características:

- O aproveitamento do biogás permite a produção de energia elétrica e/ou

calorífica;

- Comparado com sistemas de tecnologia avançada, tais como centrais incineradoras, um sistema de recuperação de biogás é mais simples e menos dispendioso;
- O biogás é o produto final da digestão anaeróbia no aterro com resíduos biodegradáveis. Deve ser drenado e utilizado energeticamente devido ao seu PCI em substituição de combustíveis fósseis: Não sendo recuperado, deve ser queimado, para diminuir o dado à atmosfera;
- A drenagem adequada é fundamental para evitar a sua migração para zonas vizinhas do aterro e sobretudo penetrar em compartimentos fechados, onde é misturado com o ar, correndo-se o risco de explosão por ignição. Quando o metano se mistura com ar, entre 5 e 15%, tem explosão espontânea;
- As unidades de produção de energia modulados podem ser facilmente deslocados para novos aterros em função da quantidade de biogás produzido;
- A quantidade de energia produzida pelo biogás não é constante, variando ao longo do período de produção, o que exige um estudo da previsão para efeitos do estabelecimento de estratégia de investimento;
- Em função da Diretiva Europeia relativa a aterros relativa à diminuição da deposição de resíduos biodegradáveis em aterro, tornará as instalações de recuperação de biogás inviáveis economicamente, com repercussões no que tange às emissões ainda assim geradas com a menor fração de biodegradáveis depositados;
- O período de recuperação do investimento é muito atrativo, situando-se em cerca de 2 anos.

## 2.3 PROCESSOS

A produção de biogás resulta da fermentação dos resíduos orgânicos através de cinco fases distintas (Tchobanoglous, 1993) e (Russo, 2005). Estas podem ser vistas na figura 2-3 apresentada.

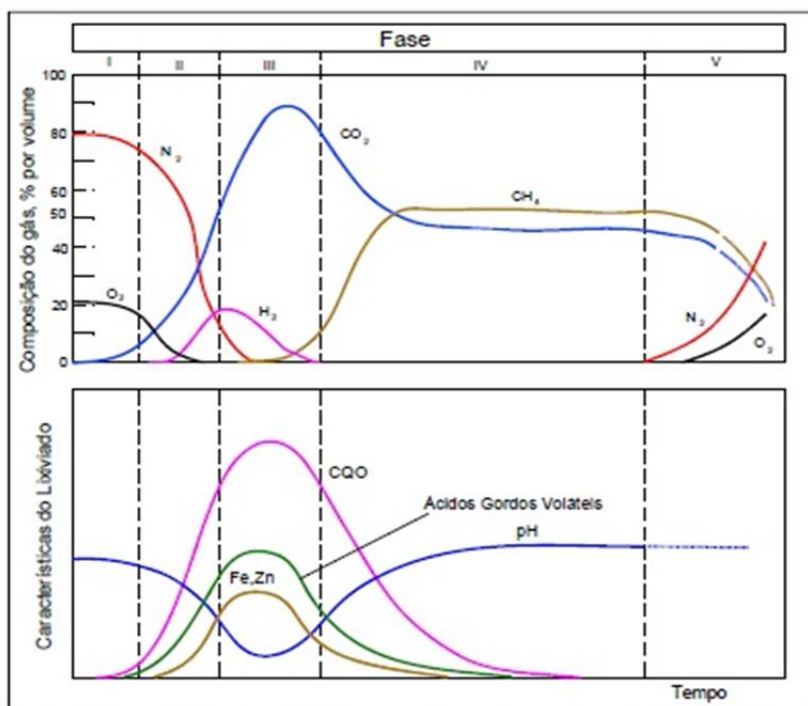


Figura 2-3 - Fases da produção de biogás em aterro.

Fonte: (Tchobanoglous, adaptado Russo, 2005).

- **Fase I (Ajuste inicial)** - Esta fase corresponde ao acondicionamento e ajustamento dos microrganismos correspondendo a uma decomposição biológica em condições aeróbias. Esta fase dura cerca de um mês podendo prolongar-se em aterros de pouca profundidade e onde existe a injeção de ar;
- **Fase II (Transição)** - A fase II corresponde ao início da anaerobiose correspondendo a um decaimento do pH dos lixiviados devido à presença de ácidos orgânicos e ao efeito das elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> na massa de resíduos (Russo, 2005);
- **Fase III (Ácida)** - As reações que tiveram início na fase II são agora

aumentadas devido ao crescente número de ácidos orgânicos e menores quantidades de hidrogénio. A fase III ou fase ácida corresponde ao início da produção de metano e dióxido de carbono. O pH dos lixiviados nesta fase é inferior a 5 levando à solubilização de muitos constituintes orgânicos e metais pesados. O lixiviado deverá ser reciclado, caso contrário os nutrientes fundamentais para o metabolismo dos decompositores, perdem-se no sistema (Russo, 2005);

- **Fase IV (Metanogénica)** - Os micros organismos predominantes nesta fase são estritamente anaeróbios e metanogênicos, ou seja convertem o ácido acético e o hidrogénio em metano e dióxido de carbono. A formação de metano e de ácidos é simultânea, embora haja uma redução significativa na formação de ácidos. O pH do lixiviado tende a ser mais básico, entre os 6,8 e 8. Esta fase pode durar entre cinco a cinquenta anos;
- **Fase V (Maturação)** - A fase V ou fase de maturação corresponde a um decréscimo considerável da produção de biogás devido à baixa biodegradabilidade dos substratos no aterro; no entanto, os principais gases que predominam são o metano e o dióxido de carbono (Russo, 2005).

A duração das fases descritas anteriormente é variável consoante o tipo de aterro sanitário, da distribuição, quantidade e características da matéria orgânica, bem como dos aspetos meteorológicos (pluviosidade e temperatura) e do modo de operação do aterro (grau de compactação, por exemplo); a falta de água retarda os processos metabólicos; a alta compactação dos resíduos dificulta a chegada de água a toda a matéria orgânica, retardando a degradação (Russo, 2005). A composição do biogás de aterro é variável, dependendo as condições anaeróbias a que está sujeito, variando entre os 45% e os 60% de CH<sub>4</sub>. É durante o período de exploração que a produção de metano é mais estável, tal como é possível visualizar na figura 2-4.

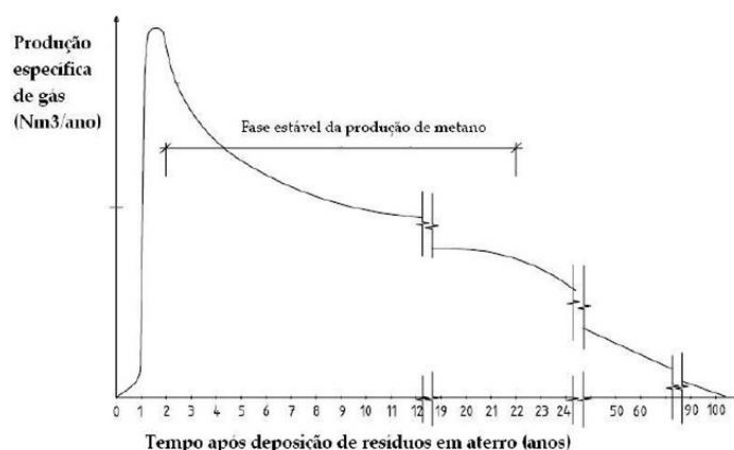


Figura 2-4 - Curva da produção de biogás em aterro.

Fonte: (Adpatado de Jensen & Pipatti, 2002).

## 2.4 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

As proporções de dióxido de carbono e metano variam consoante o tempo, as características dos resíduos depositados e variam de aterro para aterro, sendo que o biogás é composto entre 45 e 60% de metano e 40 a 60% de dióxido de carbono. Outros gases, como o azoto e o sulfureto de hidrogénio, estão também presentes na mistura, embora em quantidades muito reduzidas. Na tabela 2-2, apresentam-se valores típicos para a quantidade percentual do seu peso dos vários componentes que constituem o biogás (Tchobanoglous, 1993).

Tabela 2-2 - Constituição típica do biogás.

Componente	Fórmula	% volume (varia com a idade do aterro)
Metano	CH <sub>4</sub>	45 - 60
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	40 - 60
Nitrogénio (azoto)	N <sub>2</sub>	2 - 5
Oxigénio	O <sub>2</sub>	0.1 - 1.0
Aniões de enxofre	SO <sub>2</sub>	0 - 1.0
Amónia	NH <sub>3</sub>	0.1 - 1.0
Hidrogénio	H <sub>2</sub>	0 - 0.2
Monóxido de carbono	CO	0 - 0.2
Vestigiais	-	0.01 - 0.6

Por vezes, surgem algumas diferenças na composição, em especial em aterros com sistemas ativos de recolha de gás. Nestes casos o biogás recolhido pode demonstrar menores quantidade de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e maiores quantidades de oxigénio e azoto, sendo esta particularidade atribuída mais à gestão do sistema de recolha do biogás e possível intrusão de ar da atmosfera do que à composição do biogás aquando da sua produção. Além disso, a composição do biogás poderá ser alterada, no rácio metano/dióxido de carbono, dependendo da fase de degradação e também após a sua migração. Esta alteração da composição ocorre particularmente em aterros mais velhos, onde o caminho de migração de biogás, para locais de monitorização no exterior do aterro, é maior. À medida que o biogás migra, o dióxido de carbono tende a dissolver-se na água do solo mais facilmente que o metano, que possui uma solubilidade reduzida na água, assim criando um volume de biogás que poderá ter uma maior composição de metano. À medida que o volume de biogás diminui e a capacidade de absorção da água do solo aumenta relativamente ao fluxo de biogás, este efeito torna-se mais pronunciado e a diferença na composição torna-se mais evidente.

O biogás possui ainda outras características de relevo, sendo uma das mais importantes a de ser saturada com humidade ou vapor de água. A presença de níveis de saturação de água no biogás é um parâmetro importante no sistema de gestão do biogás, pois este ao ser canalizado para a combustão, vai alterar a sua temperatura e poderá libertar vapor de água sob a forma de condensados. A capacidade de retenção de água depende também da temperatura (tabela 2-3).

*Tabela 2-3 - Conteúdo de saturação de H<sub>2</sub>O de LFG à pressão ambiente.*

<i>LFG Temperature</i> (°C)	<i>Saturation Density</i> (L/m <sup>3</sup> )
0	5
20	17
40	51

Mesmo que os condensados sejam removidos do fluxo do biogás, poderá ser necessário retirar a humidade após a utilização do gás. O biogás pode incorporar algumas partículas, provenientes dos resíduos, devido aos movimentos de advecção do gás, sendo esta característica potenciada por sistemas ativos de recolha do biogás. Devido à humidade presente no gás e à sua potencialidade para condensação, algumas partículas poderão ser depositadas nas condutas durante a recolha do



biogás. Geralmente estas partículas não são motivo para preocupações quando o biogás é queimado, no entanto, pode ser necessária a sua remoção após ser utilizado, dependendo dos requisitos específicos dos equipamentos.

Os compostos de enxofre estão presentes, em quantidades reduzidas no biogás, estando a sua concentração e composição dependente da matéria-prima que lhe deu origem. De todos os compostos de enxofre que estão presentes no biogás, o sulfureto de hidrogénio é geralmente o mais importante agente contaminador devido aos seus efeitos de odor, na saúde e em termos de segurança. Apesar da combustão destruir cerca de 99% do sulfureto de hidrogénio, com as emissões deste gás a serem menores que os limites de risco para a população, a utilização de biogás com este componente poderá comprometer o equipamento de geração de energia. Quando a sua concentração no biogás supera os requisitos máximos definidos pelo fabricante do equipamento, torna-se necessário proceder à dessulfurização. Pode ocorrer em maiores concentrações em aterros sem membrana inferior, localizados em terrenos geologicamente ricos em enxofre ou em antigas pedreiras, assim como em aterros que aceitem lamas ricas em enxofre provenientes de estações de tratamento de águas residuais, ou ainda em aterros que aceitem grandes quantidades de gesso, como os aterros de construção e de demolição. Tipicamente o biogás contém menos de 100 ppm de sulfureto de hidrogénio, contudo em situações raras, a concentração pode atingir as várias centenas de ppm.

## 2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DO BIOGÁS

A taxa de produção dos gases em aterro depende de uma grande quantidade de fatores, os quais se podem observar na tabela 2-4:

*Tabela 2-4 - Principais fatores intervenientes no processo de produção de gases.*

Geometria e Operação do Aterro	Caraterísticas iniciais dos Resíduos	Ambiente Interno	Ambiente Externo
1. Dimensão do AT	1. Composição dos RU	1. Humidade da massa na degradação	1. Precipitação e Infiltração
2. Impermeabilização do AT	2. Humidade dos RU	2. pH no aterro	2. Variação da pressão atmosférica
3. Compatção do RU		3. Temperatura	3. Temperatura
		4. Disponibilidade de nutrientes/bactérias	4. Evaporação
		5. Presença de Agentes Inibidores	5. Humidade relativa do ar

### 2.5.1 COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS

A composição gravimétrica dos resíduos urbanos é da maior importância na produção de biogás num aterro sanitário. O volume de biogás gerado depende diretamente da quantidade e tipo de matéria orgânica na massa de resíduos, pois é a decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos que lhe dá origem. Assim, a relação entre resíduos orgânicos biodegradáveis e a produção de biogás é diretamente proporcional à quantidade de resíduos orgânicos depositados. Para além da composição, há fatores adicionais importantes, como o teor de humidade, a estruturação e a operação no aterro.

Adicionalmente, a composição dos resíduos permite saber-se o PCI, potencialidade para a incineração e produção de energia, potencial para a compostagem, em alternativa ao aterro dos biodegradáveis e o potencial de reciclagem multimaterial existente numa dada composição de resíduos numa comunidade.

Em suma quanto maior for a percentagem de materiais orgânicos, maior será a taxa de libertação de gases em aterro, e por esse motivo, potencia o seu aproveitamento, desde que rentável economicamente. A determinação da composição dos resíduos deve ser feita várias vezes ao ano, de preferência 4 vezes, porque a composição varia ao longo do ano, com as estações do ano, em concomitância com o consumo, igualmente diferenciado.

### 2.5.2 A HUMIDADE DOS RESÍDUOS

Na produção de biogás, a humidade contida nos RU depositados no interior de um aterro tem uma importância preponderante, contudo, outros fatores também são

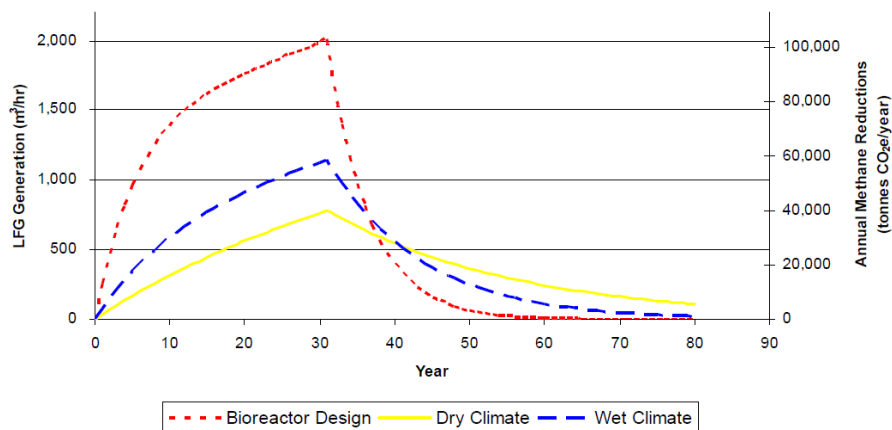
relevantes, dos quais, se enumera alguns:

- Humidade inicial dos resíduos que chegam ao aterro;
- Impermeabilização de fundo;
- Pluviosidade da região;
- Tipo de cobertura;
- Tipo de equipamento e modo de operação.

Na maioria dos casos, os resíduos sólidos quando são depositados nos aterros não estão saturados. Os dois fatores que contribuem para a saturação dos resíduos são:

- Tipo de contentores e de meios de transporte;
- A pluviosidade;
- A pressão das camadas superiores sobre as outras.

Assim que a saturação é alcançada, a pressão da água livre acelera as reações químicas e biológicas. Apresenta-se na figura 2-5 o perfil do comportamento da produção de resíduos em função do clima, onde se constata que em climas secos a produção de metano é menor, dado o fator limitante no processo que é a água.



*Figura 2-5 - Perfis típicos para a produção de biogás.*  
Fonte: (Rovers & Associados, 2010).

Como se pode constatar, nos climas secos, a recirculação dos lixiviados do aterro poderá aumentar a taxa de produção do metano. A recirculação dos lixiviados permite uma distribuição mais equitativa dos nutrientes disponíveis para os microrganismos, aumentando a rapidez de estabilização do aterro e por conseguinte potenciando a produção do biogás.

### 2.5.3 TAMANHO DAS PARTÍCULAS

O tamanho das partículas e a sua densidade afetam o transporte de nutrientes para as bactérias que decompõem os resíduos e da humidade do aterro, afetando assim a produção de biogás. Partículas de menores dimensões permitem uma maior área específica de ataque pelas bactérias, acelerando a decomposição pelo maior número de microrganismos presentes com reflexos no aumento da taxa de produção de biogás. O tamanho das partículas também vai influenciar o recalque do aterro.

Assim a compactação é um dos aspetos importantes da gestão de um aterro, em particular para diminuir bolsas de oxigénio que afetam a velocidade de degradação anaeróbia e perigo de queima lenta em profundidade quando há má compactação com vazios contendo oxigénio associado ao metano gerado da decomposição dos resíduos.

### 2.5.4 MODELAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A viabilização do investimento em equipamento e instalações para a produção de energia a partir do biogás gerado num aterro é de primordial importância e tal depende da produção que o aterro permite, em termos de volume e de tempo de geração. Assim, a previsão do biogás gerado, em função das quantidades e da qualidade dos resíduos e condições de operação, é uma ferramenta primordial. Vários modelos têm sido desenvolvidos para esse efeito, como é o caso do LandGem, da USEPA, o modelo do IPCC, entre outros. No entanto, as condições de funcionamento operativo do aterro podem determinar valores teóricos muito diferentes dos obtidos, por efeito das emissões fugidias existentes em aterros mal operados.

De qualquer modo, a modelação será tanto mais eficiente quanto mais detalhados e precisos forem os dados conhecidos. No presente trabalho utilizou-se o modelo LandGem e o do IPCC.

#### 2.5.5 ODORES

A libertação do biogás pode causar odores incómodos nas proximidades do aterro. Este fenómeno deve-se à presença de alguns compostos no biogás, sendo o principal o sulfureto de hidrogénio. Este composto pode ser detetado no olfato mesmo em quantidades muito reduzidas, como 0,005 ppm, ainda que não atinjam os limites de risco para a saúde.

Para aterros de pequenas dimensões foram desenvolvidos sistemas de encobrimento de cheiro, mas para aterros de elevadas dimensões este sistema por si só não basta. O período de maior libertação de compostos ricos em sulfureto de hidrogénio é quando os resíduos depositados mais recentes e ainda não coberto. É importante que desde o início da operação do aterro se proceda à drenagem do biogás para evitar os malefícios para o ambiente e as pessoas, sobretudo os incómodos a quem vive nas imediações do aterro.

#### 2.5.6 EMISSÕES DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA (GEE)

O metano, presente no biogás do aterro, é considerado um gás com efeito de estufa, sendo que estes gases são os responsáveis pelo aquecimento global do planeta. No ano 2000 a percentagem de metano libertada de aterros municipais foi de cerca de 12% a nível mundial. Sendo que com o crescimento previsto no número de aterros a nível mundial espera-se uma subida de 9% nas emissões globais de metano, a partir de aterros, entre 2005 e 2020. Nos países desenvolvidos existem regras, cada vez mais restritivas, de forma a evitar que a libertação de metano aumente.

#### 2.5.7 RISCOS PARA A SAÚDE E EFEITOS TÓXICOS

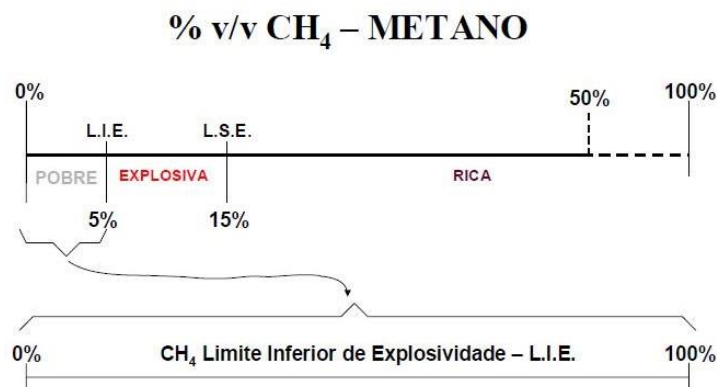
A maior parte dos riscos de saúde e de toxicidade provenientes da libertação de gases encontram-se centralizados no aterro, sendo os próprios funcionários do aterro, aqueles que se encontram em maior risco. Nas condições adequadas o biogás pode ser inflamável, sufocante e mesmo tóxico, como sucede com o sulfureto de hidrogénio são bastante elevadas. Locais apertados e em especial onde se faz a gestão de lixiviados e condensados, devem ser tomados em especial consideração pois são locais que tendem a acumular gases tóxicos. Em zonas perto do aterro a acumulação

do biogás pode também criar uma movimentação do ar atmosférico, causando assim uma zona tampão com uma reduzida concentração de oxigénio. Esta concentração, quando muito reduzida, pode criar a sufocação das pessoas. Alguns dos componentes do biogás são tóxicos quando em concentrações elevadas e outros componentes, num longo período de exposição, podem ser considerados carcinogénicos. Contudo muitos destes efeitos, quer a curto quer a longo prazo, circunscrevem-se ao aterro e são totalmente evitáveis desde que sejam tomadas as devidas precauções e medidas de segurança.

O dióxido de carbono produzido no aterro é considerado de origem biogénica, ou seja teve origem em materiais degradáveis onde o  $\text{CO}_2$  libertado na combustão do biogás é também ele considerado de origem biogénica, pois assume-se que faz parte do ciclo natural do carbono. Quando não é possível, por qualquer razão, não se aproveitar o biogás para combustível na geração de energia, deve ser queimado para eliminar o  $\text{CH}_4$ , que é 21 vezes mais nefasto para a camada de ozono que o  $\text{CO}_2$ .

#### 2.5.8 EXPLOSÕES

O risco de explosão pode ocorrer quando a concentração de metano no ar atmosférico excede a limite inferior de explosividade (LIE). O LIE do metano é de cerca de 5% em volume de ar atmosférico, sendo que a concentração de metano no ar, entre 5 e 15% é explosiva (figura 2-6).



*Figura 2-6 - Limites de explosividade do metano.*

O risco de explosão é também acrescido quando se trata de locais confinados e pouco ventilados. Também se pode dar o caso de as explosões se darem nas proximidades do aterro quando à migração do biogás pelo subsolo, devido a má drenagem destes gases e má operação do aterro.

Os sistemas passivos e ativos de ventilação na extração do biogás são fundamentais. Na monitorização do aterro deve proceder-se à medição das concentrações no topo das camadas em exploração e no fim da exploração, para determinar os níveis não só de CH<sub>4</sub>, como de CO, que pode indiciar queima lenta em profundidade.

#### 2.5.9 STRESS DA VEGETAÇÃO

O stress vegetal é um sinal indicativo de que o biogás do aterro migra através da superfície ou da cobertura final do aterro, podendo também se dever ao arrastamento de substâncias que são tóxicas para as plantas. Esta migração do biogás provoca uma diminuição nos níveis de oxigénio, intoxicando assim a vida vegetal. Este stress da vegetação, além de ser inestético, pode originar problemas de índole prática. A falta de vegetação poderá originar causar ou potenciar a erosão da cobertura, levando assim a efeito de cascata em que o resultado final é a libertação de maiores quantidades de biogás.

O stress da vegetação, quando isolado, poderá não obrigar a aplicar medidas de controlo da libertação do biogás, mas sem dúvida obriga a uma monitorização mais atenta da área em particular pela possibilidade de originar um efeito de cascata como foi mencionado anteriormente, pois é um sinal claro de libertação do biogás. Caso o stress da vegetação ocorra em zonas onde já foi depositada a cobertura final do aterro serve como um indicativo de que poderá ser necessário adicionar material extra na cobertura, reduzindo-se assim a libertação do gás do aterro e melhorando a captação do mesmo. Em termos estéticos o stress da vegetação também poderá originar problemas aquando da arquitetura paisagística final do aterro. Em última instância o stress vegetal poderá indicar a necessidade de medidas de controlo do aterro, como por exemplo a instalação de poços verticais de extração do biogás nas áreas afetadas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LOCAL DE ESTUDO

Os trabalhos decorreram na empresa gestora de resíduos em alta, “RESULIMA – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A.”, que explora o Sistema Multimunicipal (SMM) de Triagem, Recolha Seletiva, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos do Vale do Lima e Baixo Cávado. A RESULIMA é constituída por seis municípios (Arcos de Valdevez, Barcelos, Esposende, Ponte da Barca, Ponte de Lima e Viana do Castelo) que integram o Sistema Multimunicipal (figura 3-1) e pela Empresa Geral do Fomento, S.A. (EGF) em representação do Estado.



*Figura 3-1- Municípios que integram o sistema multimunicipal do Vale do Lima e Baixo Cávado.*

Em 26 de Outubro de 1996 que a RESULIMA assinou com o estado Português um contrato de concessão por 25 anos, relativo ao Sistema Multimunicipal (SMM). No âmbito desta concessão foi construído o Aterro Sanitário de Vale de Lima e Baixo Cávado (ASVC) localizado na freguesia de Vila Fria, concelho de Viana do Castelo, (figura 3-2) tendo a sua exploração iniciado a 18 de Dezembro de 1998. O ASVC confronta com cinco freguesias que são: Vila Fria, Alvarães, Vila Nova de Anha, Chafé e Neiva (S. Romão) e tem como acessos principais a A28, a N13 e a N103.





*Figura 3-2 - Disposição geográfica do ASVC.*

Com o arranque das infraestruturas do ASVC, o primeiro objetivo do SMM, consistiu na selagem das antigas lixeiras faseadamente. Assim, as lixeiras da tabela 3-1 foram progressivamente desativadas e seladas.

*Tabela 3-1 - Localização das lixeiras encerradas no SMM com a criação do ASVC.*

Concelho	Freguesia	Data de encerramento
Arcos de Valdevez	Oliveira	Março 2000
Barcelos	Gamil	Julho 2000
Ponte da Barca	Sampriz	Março 2000
Ponte de Lima	Fornelos	Fevereiro 2000
Viana do Castelo	Vila Fria	Dezembro 1998

Apresenta-se a seguir os indicadores demográficos em cada concelho referente à área abrangida pelo ASVC.

A RESULIMA abrange uma área total de 1.743 km<sup>2</sup> e serve uma população de cerca de 319 mil habitantes (INE, 2013), tal como se descremina na tabela 3-2.

*Tabela 3-2 - Indicadores Demográficos da RESULIMA.*

<b>Concelho</b>	<b>População 2013 (hab)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidade Populacional (hab/km<sup>2</sup>)</b>
<i>Arcos de Valdevez</i>	22.284	448	50
<i>Barcelos</i>	119.824	379	316
<i>Esposende</i>	34.268	95	361
<i>Ponte da Barca</i>	11.829	182	65
<i>Ponte de Lima</i>	43.151	320	135
<i>Viana do Castelo</i>	87.570	319	275
<b>Total</b>	<b>318.926</b>	<b>1.743</b>	<b>183</b>

Numa perspetiva nacional, a RESULIMA representa aproximadamente 2,0 % da área do território de Portugal Continental e concentra cerca de 3,2 % da população. O capital social da sociedade RESULIMA é de 2.500.000 € e a sua estrutura acionista é a seguinte:

- Empresa Geral do Fomento (EGF) – 51%;
- Município de Arcos de Valdevez – 4,3%;
- Município de Barcelos – 17,7%;
- Município de Esposende – 4,8%;
- Município de Ponte da Barca – 2,1%;
- Município de Ponte de Lima – 6,9%;
- Município de Viana do Castelo – 13,2%.

A produção de resíduos urbanos na área de influência da RESULIMA foi, em 2014, de cerca de 119.164 Mg, correspondendo a uma capitação média de cerca de 1,13 kg/hab.dia (RESULIMA, 2014).

As infraestruturas principais da RESULIMA ao serviço do SMM (figura 3-3) são:

- 1 Aterro Sanitário, localizado em Vila Fria, Viana do Castelo (ASVC);
- 1 Estação de Transferência, localizado em Oliveira, Arcos de Valdevez;
- 1 Central de Triagem, no espaço físico do ASVC;
- 2 Ecocentros, um no ASVC e outra na Estação de Transferência;
- 962 Ecopontos (de superfície e subterrâneos) para a recolha seletiva,

(PERSU2020, 2015).



*Figura 3-3 - Modelo técnico da RESULIMA.*  
Fonte: (PERSU2020, 2015).

### 3.1.1 INFRAESTRUTURA DO ASVC

Um aterro sanitário para que possa ser aproveitado e gerido da melhor forma deve ser concebido através de um conjunto de alvéolos que permitam a criação de setores de enchimento independentes. Desta forma, o enchimento de cada alvéolo pode ser efetuado independentemente, passando-se para o seguinte à medida que as cotas superiores forem atingidas (Cabeças, 2005). Existem vários métodos para a deposição dos resíduos no aterro, o método tradicional, em que os resíduos são depositados em bruto numa célula diária e posteriormente são compactados e arrumados. Existe o método por enfardamento, em que os RU são compactados num equipamento próprio e de seguida são encaminhados para a frente de trabalho do aterro. Existe o método misto, que é uma mistura dos dois referidos anteriormente e o método com trituração prévia dos resíduos, que, tal como o nome indica, os RU são triturados junto à zona da frente de trabalho do aterro e aí depositados posteriormente (Cabeças, 2005).

O Aterro Sanitário do Vale de Lima e Baixo Cávado (ASVC) situado em Vila Fria, Viana do Castelo, é classificado de “Aterro para Resíduos Não Perigosos” e tem uma superfície de 28 hectares. Os principais serviços fornecidos pelo ASVC, para os utilizadores municipais ou particulares, são:

- Receção de Resíduos Sólidos Urbanos (RU) e equiparados;

- Tratamento e deposição de RU;
- Receção e triagem de objetos volumosos fora de uso e materiais com potencial de valorização;
- Receção de terras limpas;
- Receção de misturas não contaminadas de resíduos de construção e demolição (RCD), inertes;
- Receção de fluxos de resíduos específicos, em função das autorizações vigentes.

No ASVC encontra-se as seguintes infraestruturas de receção, processamento, deposição, tratamento e controlo:

- Célula única para a deposição de resíduos indiferenciados com cerca de 10 hectares, dividida em 5 alvéolos de aproximadamente 2 hectares cada;
- Portaria;
- Báscula de pesagem;
- Edifício de receção, administrativo, técnico e social;
- Armazém, oficina e fosse de manutenção;
- Sistema de lavagem de rodas;
- Reservatório subterrâneo de armazenamento de gasóleo;
- Edifício com unidade de prensagem e enfardamento de RU, com dois fossos laterais;
- Prensa enfardadora de papel, cartão e embalagens plásticos;
- Prensa enfardadora de metais;
- Ecocentro para armazenamento de resíduos de grandes dimensões;
- Central de triagem com área de armazenamento;
- Plataformas de armazenamento de vidro;
- Plataformas específicas para armazenamento de sucata, pneus e Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE);

- Sistemas de neutralização de odores;
- Estação de Tratamento de Águas Lixivantes (ETAL);
- Laboratório;
- Centro Eletroprodutor (CEP) com capacidade de produção elétrica de 2 MW;
- Unidade de queima de biogás de 1000 Nm<sup>3</sup>/h (complementar ao CEP).

Para proteger o ambiente e assim diminuir ao máximo os impactos ambientais do aterro, o ASVC possui 3 grandes sistemas de proteção ambiental que são:

- Sistemas de impermeabilização de fundo e taludes da Célula;
- Sistema de drenagem, captação e tratamento de lixiviados;
- Sistema de drenagem, captação e valorização energética / queima de biogás.

As localizações das principais infraestruturas do ASVC estão representadas na figura 3-4.



*Figura 3-4 - Localizações das principais infraestruturas do ASVC.*



### 3.1.2 CARATERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

De acordo com o decreto-lei 178/2006 (Diário da República, 2006), resíduo é definido como “*qualquer substância ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou obrigação de se desfazer...*”, ainda segundo este decreto-lei os resíduos podem ser classificados de acordo com a sua origem, em: agrícolas, de construção e demolição, hospitalares e industriais: Quanto às suas características, podem ser classificados em: inertes, perigosos e não perigosos, onde se encaixam os resíduos urbanos.

O aterro da RESULIMA recebe, na sua maioria, resíduo urbano. O RU tem como particularidade o facto de acompanhar o progresso tecnológico e económico das sociedades, sendo a sua quantidade e qualidade diretamente afetadas por estes dois fatores. De uma forma geral pode-se afirmar que nos centros urbanos, o resíduo produzido é composto na sua grande maioria por papel, metais, plásticos, vidros e respetivas embalagens, sendo a quantidade maior em países mais ricos devido ao seu maior poder de compra. O RU, como foi mencionado anteriormente, pode ter várias formas de tratamento e de deposição final, sendo o aterro uma delas. Na figura 3-5, podemos observar o ciclo do RU.

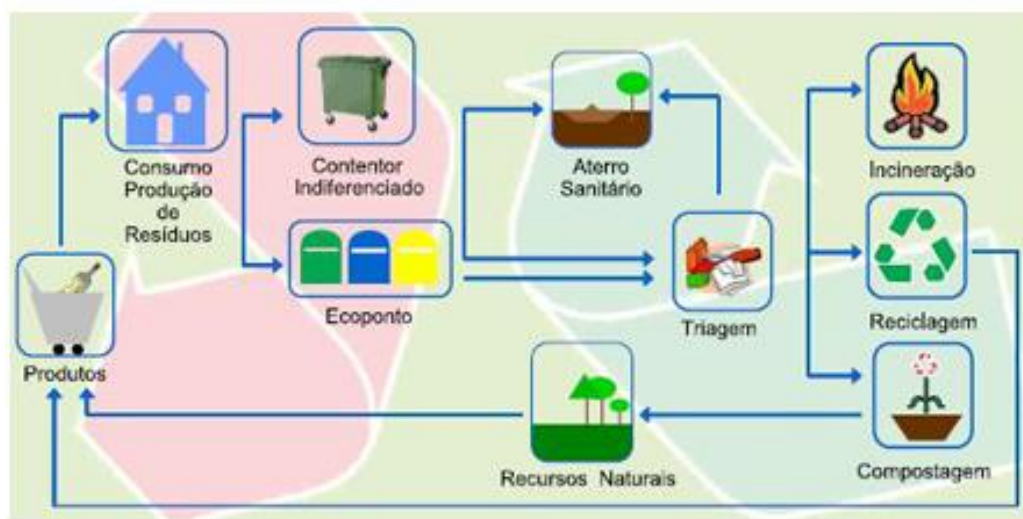
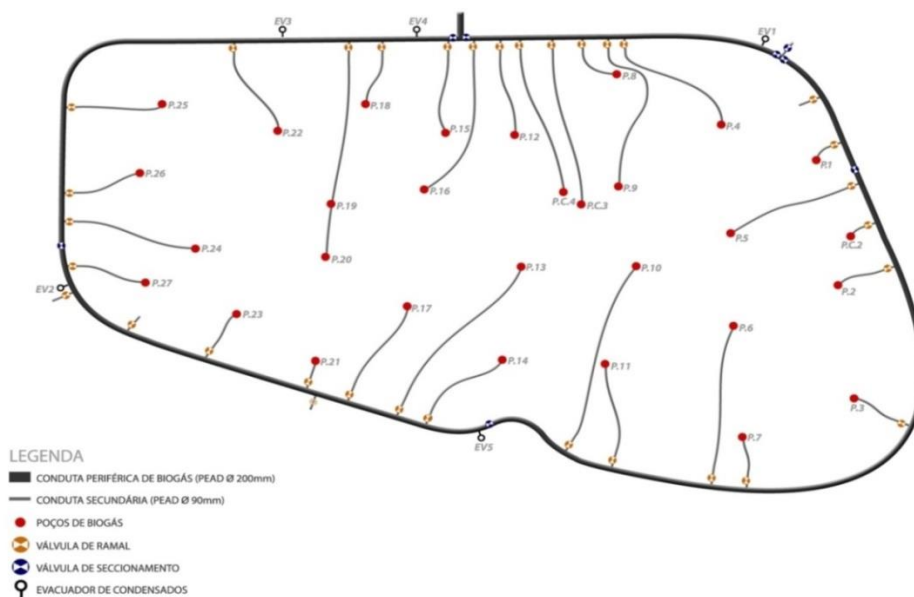


Figura 3-5 - Ciclo do resíduo urbano.  
Fonte: (RESULIMA, 2015).

## 3.2 ASPETOS CONSTRUTIVOS DA REDE DE BIOGÁS DO ASVC

### 3.2.1 REDE EXTERIOR DO BIOGÁS

O primeiro passo a cumprir para o aproveitamento energético do biogás ser possível reside na captação do mesmo. Segundo (Seara de Brito, 2006), casos em que o biogás é aproveitado para valorização energética, os gases são drenados para poços de captação por forma a evitar emissão descontrolada para a atmosfera. Esta medida de aproveitamento abrange diversas necessidades energéticas, tais como, a produção de energia elétrica, a geração de calor, ou aplicação direta como um combustível de locomoção, verificando-se esta abrangência graças ao seu PCI significativo. Todavia, a valorização energética dos RU e do biogás em aterros sanitários não se revela semelhante entre aterros. Cada instalação apresenta especificidades próprias, adaptadas ao local de produção, à utilidade do recurso energético disponível e à legislação vigente. O desenvolvimento de uma boa rede de captação do biogás é um fator relevante para o CEP, assim o meu estudo também incidiu sobre a rede de biogás. Como já referi, a alimentação do CEP, em termos de quantidade e qualidade, é determinante para aproveitar o potencial máximo desta unidade de valorização energética. Assim “o coração” do CEP não são os motogeradores, mas sim o aterro que vai permitir a adequada alimentação em combustível do CEP. É por isso, entre outros parâmetros, que a conceção do aterro, como o seu enchimento com RU, deve ser bem planeado desde o início da exploração deste para poder captar a máxima quantidade de biogás com boa qualidade. Desta forma, a rede de captação e a boa qualidade dos drenos que vão recuperar o biogás é de extrema importância, podendo ser observada na figura 3-6, a rede atual do ASVC.



*Figura 3-6 - Rede de captação de biogás do ASVC.*  
 Fonte: (Statplanet, 2010).

O ASVC utiliza um sistema ativo de recolha do biogás, ou seja possui um compressor sincronizado com uma rede de poços verticais, ligados por sua vez a ramificações horizontais, que permitem uma boa extração do biogás. Assim, apesar do principal objetivo de um sistema ativo de recolha ser a diminuição do potencial de aquecimento do biogás, a sua implementação poderá também auxiliar na valorização energética e controlo da migração do biogás. As cabeças de captação do biogás, que podem ser observadas na figura 3-7, devem ser bem repartidas na área total da célula de deposição para se poder recuperar o máximo de biogás produzido pelo aterro.



*Figura 3-7 - Diversas cabeças de captação de biogás do ASVC.*

Estas cabeças permitem captar o gás do aterro que é depois encaminhado em direção a uma conduta periférica em PEAD (Polietileno de Alta Densidade) com um diâmetro de 200 mm, que pode ser visualizado na figura 3-8 por condutas secundárias, também em PEAD, com diâmetro de 90 mm. A conduta periférica canaliza todo o biogás do aterro que depois é enviado para o CEP e / ou o queimador por aspiração destes e



com a ajuda da sobrepressão criada com a acumulação do biogás no aterro.



*Figura 3-8 - Conduta periférica do Biogás no ASVC.*

Geralmente as condutas periféricas possuem diâmetros crescentes conforme a sua aproximação ao compressor, de forma a acolher a quantidade crescente de biogás recolhido, sendo que, no ASVC, o diâmetro é uniforme em todo o aterro. Ao determinar o diâmetro da conduta periférica também foi tido em conta o facto de haver picos de produção de biogás, possibilitando-se assim o transporte de todo o biogás produzido. A ligação com o compressor é realizada em apenas um único ponto da conduta periférica, sendo que, este único ponto de ligação é um dos responsáveis pela variação da pressão ao longo da conduta periférica. Esta temática será detalhada com o decorrer deste trabalho. De acordo com as boas práticas construtivas de aterros, a conduta periférica foi construída de forma a poder ser seccionada em diferentes troços ao longo do seu trajeto. No caso do ASVC este pode ser seccionado em 3 partes distintas. Esta possibilidade de seccionar o aterro em partes diferentes permite responder a várias necessidades inerentes à manutenção do aterro (reparações, inspeções, expansão do sistema, etc.) sem a obrigatoriedade de encerrar totalmente a rede de recolha do biogás. Além da possibilidade de seccionar o aterro, outra boa prática construtiva da rede de biogás é, em cada poço, existir uma válvula de ramal que permite ter mais ou menos caudal de biogás do poço na conduta periférica e o assegurar em dois pontos distintos a respetiva monitorização, (uma junto à cabeça do poço e a outra próxima das válvulas de ramais). Na figura 3-9 e figura 3-10, observam-

se dois tipos de válvulas: a válvula de medição e a válvula de ramal.



*Figura 3-9 - Exemplo da válvula de ramal.*



*Figura 3-10 - Exemplo da válvula de medição próximo da válvula de ramal.*

A presença das válvulas de medição próximas das cabeças de poços é para facilitar as operações de manutenção, ou a identificação de potenciais problemas nos poços de biogás e posterior análise individualizada, havendo também, a possibilidade de identificação de uma secção problemática do aterro ou eventualmente um problema na conduta secundária. Todavia, como as válvulas de medições próximas das cabeças de poços são bastante antigas e começam a surgir problemas de entrada de ar, ou seja, estas começam a ser eliminadas porque a monitorização da qualidade do biogás se faz quase exclusivamente nas válvulas de medição próxima das válvulas de ramais.

A disposição das condutas periféricas no aterro depende de vários fatores, características e próprios do aterro, como por exemplo a morfologia do aterro, o espaço disponível, o custo dos materiais, o design do aterro e o nível de operações a decorrer. No caso do ASVC pode-se considerar como um sistema de disposição em anel, exterior à massa de resíduos. Este tipo de disposição da conduta periférica tem como vantagens a flexibilidade de operações associada às cabeças dos poços, permitindo também uma maior remoção de condensados e a redução de problemas associados à

colocação de novas tubagens nos resíduos.

As condutas periféricas são, geralmente, enterradas no solo, sendo necessária a perfuração em aterros que possuam cimento no seu rebordo ou uma membrana sintética. O enterramento da conduta periférica permite no verão protegê-la das radiações solares, evitando assim a sua dilatação. Por seu turno, no Inverno, ficam protegidas das baixas temperaturas, que provocariam o aumento da quantidade de condensados, o que potencia a formação de tamponamento hidráulico. Deve-se ter em conta que para enterrar uma conduta periférica o solo deve ser estável para garantir a fixação da conduta e manter assim o declive que permite o escoamento dos condensados.

As condutas secundárias, como se pode observar na figura 3-11, devem ser posicionadas com uma ligeira inclinação regular para evitar acumulações de condensados. No interior do aterro a temperatura é constante e moderadamente elevada, no geral acima dos 30 °C. Estas temperaturas podem provocar um pequeno choque térmico, principalmente durante a estação de inverno, aquando da passagem do biogás do aterro para a cabeça de captação e por consequente poderiam criar um tampão hidráulico que entupiria a conduta secundária e impediria a captação do biogás nesta cabeça. Assim, para evacuar os condensados provenientes do biogás que se acumulam na conduta periférica, que está em posição relativamente horizontal, são previstos 5 pontos de evacuação dos condensados em toda volta desta conduta localizados em pontos com as cotas mais baixas.



*Figura 3-11 - Posicionamento das condutas secundárias de biogás no ASVC.*

Alguma bibliografia poderá indicar que estas condutas, bem como a conduta periférica, deveriam ser protegidas contra temperaturas muito baixas, caso contrário o líquido

condensado e o gás húmido poderão congelar no interior das condutas e reduzir ou mesmo bloquear a passagem do biogás. Ao providenciar uma proteção térmica diminui-se a quantidade de líquidos condensados. Na generalidade dos casos o método com melhor custo/benefício é insuflar as condutas, ou seja, simplesmente enterrá-las, abaixo do ponto de congelação do solo. No ASVC apenas se enterrou parte da conduta periférica, pois as restantes condutas ainda não se encontram na sua posição final e poderão ainda ser deslocadas de sítio, uma vez que o aterro ainda não foi encerrado definitivamente.

### 3.2.2 REDE INTERIOR DO BIOGÁS

As lixeiras não possuem uma membrana inferior ou um sistema de drenagem de lixiviados, poluindo os lençóis freáticos que se encontrem abaixo delas. No entanto, os aterros sanitários atuais, como o ASVC, possuem membranas sintéticas inferiores, que servem como forro à deposição dos resíduos, e sistemas de recolha dos lixiviados produzidos. Os efeitos que a membrana inferior tem a nível do biogás são o seu conteúdo em humidade e na migração do biogás através da subsuperfície. A quantidade de lixiviados presentes no aterro é uma mistura entre a humidade inicial dos resíduos e da precipitação, sendo que o amontoar destes lixiviados pode ser diminuído através do uso de solos com baixa permeabilidade ou membranas sintéticas para coberturas intermédias e de uso diário, ou mesmo nas coberturas finais para reduzir a infiltração. Membranas inferiores com uma permeabilidade reduzida quando combinadas com sistemas de recolha de lixiviados são o mais recomendado para otimizar o controlo da migração do biogás bem como do seu principal objetivo, ou seja controlar potenciais impactos negativos nos lençóis freáticos situados abaixo do aterro.

Os poços de biogás, onde as cabeças são as partes visíveis, são executados verticalmente na célula desde a sua base, sendo incrementados à medida que os resíduos depositados vão evoluindo em altura. Os poços são constituídos com tubagens em PEAD de diâmetro 160 mm ranhuradas radialmente a 360 °, como se pode observar na figura 3-12, e à medida que o aterro vai progredindo em altura vão sendo ligadas entre tubos por uniões de aço inox.



*Figura 3-12- Conduitas ranhuradas utilizadas para implementar os poços verticais de biogás.*

Estes poços verticais são preenchidos, numa área circular de cerca de 2 metros de diâmetro, na envolvente do tubo de biogás com brita ou outro material drenante (Figura 3-13) substituto de forma a facilitar a sucção do biogás pelo sistema de captação implementado.



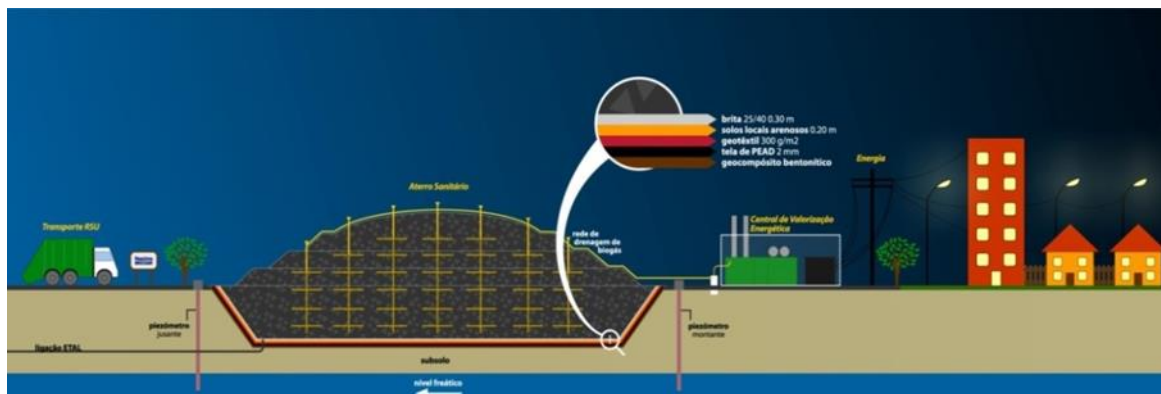
*Figura 3-13 - Material drenante utilizado no ASVC.*

Esta área circular intersesta as diferentes redes de drenagem com as ramificações horizontais, normalmente de 4 em 4 metros de altura do aterro, constituído por malhas deitadas. Na maioria dos aterros a implementação da rede de drenagem é feita em estrela, o que no caso de uma falha ao nível de um deles compromete uma área do aterro de onde não se consegue extrair o biogás. No caso particular do ASVC, esta rede de drenagem é feita em quadrado, assim mesmo quando um dos drenos sofre uma falha, o biogás terá sempre um outro percurso para atingir o poço e ser extraído.

Esta rede, bastante ampla, diminui um bocado a capacidade volumétrica do aterro a receber os RU mas apresenta grandes vantagens no que diz respeito à garantia de uma boa captação do biogás (para cima) e também uma eficácia no escoamento das águas lixiviantes (para baixo do aterro) garantido assim um menor risco de entupir as



condutas de biogás com lixiviados. Um esquema desta rede, bem como da implementação de todo o sistema do CEP, pode ser visualizado na figura 3-14.



*Figura 3-14 - Representação esquemática da rede e valorização de biogás.*

A cobertura do aterro é também um fator crucial na manutenção da rede do biogás, pois esta será responsável pela intrusão ou não de ar atmosférico. Desta forma, solos argilosos ou membranas sintéticas oferecem uma permeabilidade reduzida no aterro, o que pode resultar numa taxa de produção reduzida e um maior tempo de produção do metano. Coberturas com baixas permeabilidade têm tendência a inibir a ventilação do biogás para a atmosfera, podendo resultar simultaneamente num aumento da pressão no interior do aterro consequente aumento da migração do biogás pela superfície, sendo uma exceção feita aos aterros cuja cobertura é soldada à membrana inferior. O uso de cobertura de reduzida permeabilidade está indicado para o controle da infiltração da precipitação para o interior dos aterros que já possuam problemas de libertação de lixiviados. As coberturas de baixa permeabilidade podem permitir uma elevada eficiência de recolha do biogás ao permitir, em alguns casos, um maior esforço ao nível de vácuo quando implementado um sistema de gestão eficiente e por possuir um maior raio de influência no resíduos.

Por seu lado uma cobertura permeável, como por exemplo a areia grossa, promove a infiltração da precipitação nos resíduos, sendo que tal como foi discutido anteriormente a humidade dos resíduos é um fator de extrema importância na produção do biogás, devendo-se também ter em consideração que, quanto maior for a quantidade de lixiviados, menor será a área de onde se poderá retirar o biogás. Dentro de uma certa gama de valores podemos assim afirmar que resíduos com um maior teor de humidade tendem a aumentar a produção de metano, durante um período de tempo. As coberturas de permeabilidade reduzida também permitem uma ventilação mais

rápida da atmosfera para o interior do aterro, o que poderá resultar em baixas pressões no interior e por consequente numa menor migração do biogás através da superfície. Este tipo de cobertura poderá também ser responsável pela intrusão de ar atmosférico ao mesmo tempo que decorre a extração do biogás, diminuindo assim a fração de metano e permitindo a decomposição aeróbia dos resíduos. A decomposição aeróbia é caracterizada por possuir taxas rápidas de abatimento dos terrenos do aterro, odores mais intensos, reduzidas frações de metano no biogás e temperaturas mais elevadas, aumentando a possibilidade de incêndios. A intrusão de ar atmosférico pode ser controlado ao se integrar o sistema de recolha do biogás com a cobertura do aterro e por se realizar uma eficiente monitorização e ajuste no sistema de recolha de biogás. Deve-se também salientar que, a intrusão do ar atmosférico tem também como consequência negativa o facto de diminuir o raio de influência da extração de biogás. Em casos extremos pode-se efetivamente considerar que a função da cobertura é de todo inexistente, sendo que existe uma espécie de curto-circuito entre a atmosfera e o interior do aterro, sendo que o aterro é caracterizado por fortes odores, libertados das áreas entre as zonas diminuídas que envolvem os poços.

Em suma na escolha da cobertura do aterro devem ser tomadas em consideração os efeitos e repercussões que a própria cobertura tem nos restantes componentes do aterro e deve ser orientada de forma minimizar ou potenciar os efeitos pretendidos. No caso do ASVC foi construído um parque de terras, uma zona em terra batida, com cerca de 8.800 m<sup>2</sup>, onde são depositadas seletivamente vários tipos de terras para execução de diversos trabalhos como a cobertura diária dos resíduos, proteção da geomembrana do talude de bordadura, construção de rampas e caminhos de circulação sobre os resíduos, combate a incêndios, constituição de stock para cobertura final, etc...sendo observada na figura 3-15.



*Figura 3-15 - Parque de Terra do ASVC atrás das lagoas de regularização.*

Normalmente a terra utilizada nas operações de cobertura (parcial ou final) é proveniente da escavação da própria célula de deposição do aterro, aquando da sua construção. No caso da RESULIMA as poucas terras provenientes da escavação da célula (de características argilosas) foram utilizadas na cobertura da antiga lixeira. Por esse motivo a empresa necessita de recorrer à aceitação graciosa ou compra de terras adequadas para complementar as coberturas diárias. A empresa tem testado também a implementação de uma membrana sintética a fim de estudar o comportamento do aterro e utilizá-la como cobertura final, sendo esta soldada à membrana inferior.

O sistema de drenagem implementado no ASVC é bastante eficiente, porque consegue extrair uma grande quantidade de lixiviados, no verão é necessária a humedificação do aterro. Este processo consegue-se através da recirculação dos lixiviados. A não aplicação da recirculação de lixiviados poderá comprometer a boa produção do biogás.

### 3.3 MONITORIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO ASVC

A monitorização tem como objetivo principal quantificar e qualificar o biogás produzido, contrapondo com os dados obtidos no LandGEM, de forma a assegurar o estudo exaustivo e real das capacidades de produção biogás do aterro. Atualmente, o objetivo da monitorização da qualidade do biogás na RESULIMA, como em todos os aterros sanitários que efetuam a valorização energética do biogás, é a de atingir os requisitos mínimos de qualidade do biogás para garantir o funcionamento a 100% do conjunto do Centro Eletroprodutor (CEP) do Biogás, no caso em estudo, para que os dois motores de combustão interna, com uma potência total de 2 MW, funcionem na maioria do



tempo à carga máxima.

O critério mais importante na avaliação da qualidade do biogás é a fração de metano (%  $\text{CH}_4$ ). Perante este cenário, o AS tem de garantir a produção de um biogás com valor de metano superior à 54%. Em 2014, a percentagem de metano foi 59%, na fração do biogás, permitindo ter uma margem de segurança, sendo que abaixo dos 56%  $\text{CH}_4$ , os motores reduzem automaticamente e gradualmente a potência máxima autorizada: em suma quanto menor é a fração de metano, maior é a queda de potência dos motores e por consequência menor será a produção de eletricidade no CEP.

Em relação as frações de azoto ( $\text{N}_2$ ) e de oxigénio no biogás, elas devem aproximar-se o máximo possível de 0%, pois se temos concentrações elevadas de azoto e oxigénio no biogás, significa que a concentração de metano será mais baixa. Além disso, a presença destes gases, no circuito de alimentação de combustível do CEP, perturba o rácio ar/combustível dos motores e impedindo-os de funcionar nos seus pontos ótimos. Deve-se também ter em conta que a nível dos motores é permitida uma concentração máxima de 5% de oxigénio na sua conduta de alimentação, pois um nível anormalmente elevado de oxigénio na conduta de combustível dos motores poderia significar uma rutura da conduta.

No que concerne ao sulfeto de hidrogénio ou ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) presente no biogás, a finalidade é elimina-lo completamente no CEP, pois este fator é o responsável pela libertação de odores num aterro sanitário, mesmo sendo a sua concentração bastante reduzida no biogás, na ordem das centenas de partes por milhão (ppm).

No entanto, quanto maiores são os níveis de sulfeto de hidrogénio nos motores do CEP, maiores vão ser os desgastes dos componentes mecânicos, pois o sulfeto de hidrogénio é ácido. Assim se explica que os motores de combustão interna que funcionam nos aterros sanitários, isto é, que utilizam como combustível o biogás, são geralmente derivados de motores a gás natural, concentração em metano superior a 85% e com teor de  $\text{H}_2\text{S}$  na ordem das unidades de ppm, modificados para resistir aos efeitos corrosivos do sulfeto de hidrogénio. Relativamente a quantidade de biogás

fornecido pelo aterro sanitário, ela tem de ser suficiente para abastecer os dois grupos electroprodutores em marcha de potência máxima, o que corresponde a um caudal de 1100 Nm<sup>3</sup>/hora.

### 3.4 METODOLOGIA DA MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS NO ASVC

A realização de uma campanha de medição do biogás no ASVC resume-se a dois momentos: verificação do bom funcionamento do analisador de gás e as respetivas medições.

### 3.5 CARATERISTICAS DOS EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS DE MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS

A medição da qualidade do biogás no ASVC, que permite determinar as concentrações de metano (CH<sub>4</sub> em % v/v), de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> em % v/v), de sulfeto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S em ppm), de oxigénio (O<sub>2</sub> em % v/v), de azoto (N<sub>2</sub> em % v/v) e o monóxido de carbono (CO em ppm) é feita por um analisador de gases que possui detetores infravermelhos e um sensor eletroquímico, sendo composto por uma vareta de medição e a unidade móvel figura 3-16. Este analisador de biogás possui um teclado para realizar os processos de medição e armazenamentos dos resultados como um visor informativo (figura 3-17) Simultaneamente, foi utilizado um medidor recentemente adquirido pela ESTG (figura 3-18).



*Figura 3-16 - Medidor de biogás móvel com a vareta de medição utilizado na RESULIMA.*



Figura 3-17 - Vista do teclado e do visor do analisador de gases.

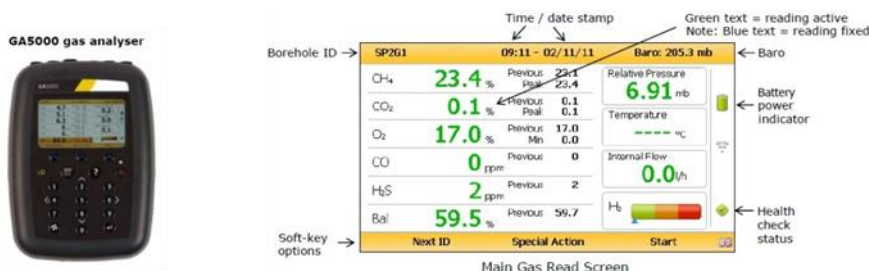


Figura 3-18 - Vista do analisador de gases recentemente adquirido pela ESTG.



Figura 3-19 - Bomba parada (visualização dos parâmetros CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>).



Figura 3-20 - Bomba funcionar (visualização dos parâmetros CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> após 18 segundos).

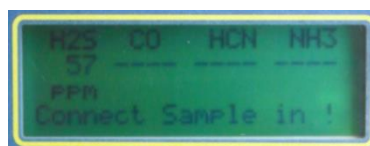


Figura 3-21 - Parâmetro H<sub>2</sub>S.

Este aparelho (figura 3-19, figura 3-20 e figura 3-21) mede por amostragem a concentração volúmica de seis constituintes principais do biogás (mais um, desde 1 de janeiro de 2014), devido a uma exigência na última renovação da licença ambiental de medir o monóxido de carbono com ajuda duma bomba integrada e devolve o resultado pelo visor. O tempo de amostragem é gerido pela ativação / desativação manual da bomba com a tecla *pump*. O estado de ativação da bomba é visualizado no visor, sendo o tempo de ativação estabelecido em segundos.

### 3.6 VERIFICAÇÃO INICIAL DO MEDIDOR

A fase de verificação inicial do analisador de gás deve ser obrigatoriamente efetuada antes de uma campanha de medição de biogás e num local afastado do aterro sanitário. Este teste permite averiguar os valores de concentrações dos diferentes

gases fornecidos pelo aparelho ao fazer uma medição em “branco” da composição do ar ambiente. Assim, para este efeito, efetuamos os passos seguintes:

Ligar o medidor de gás no botão *on / off*, aparecendo a informação da data da próxima calibração do analisador pelo próprio fornecedor. Esperando alguns segundos aparece uma mensagem informativa no visor (figura 3-22) e carrega-se no botão *OK* para ter acesso à função medição;



Figura 3-22 - Mensagem inicial do analisador de gás após o arranque.

- Ligar a vareta de medição a unidade móvel do analisador de gás e efetuar uma medição de 100 segundos ao carregar no botão *pump* uma primeira vez para iniciar a medição e uma segunda vez no mesmo botão *pump* para parar a medição, quando a contagem do decorrer do tempo de medição chegar ao valor desejado. Desta forma estamos a medir a composição volúmica do ar ambiente que deverá ser próximo de 21% para o oxigénio, 79% para o azoto, 0% para o metano e dióxido de carbono, e ainda com 0 ppm para o sulfeto de hidrogénio (figura 3-23);



Figura 3-23 - Composição do ar ambiente durante a calibração inicial do analisador de gás.

- Depois de visualizar os resultados do teste em — branco e verificar que os resultados são coerentes, carregar no botão *cancel* para não guardar esta medição e começar assim a campanha de medição de biogás no ASVC.

### 3.7 MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS NOS POÇOS

Antes de realizar a medição da qualidade do biogás dum poço do aterro, deve-se verificar que a válvula de ramal relacionada com o poço em medição deve estar aberta pelo menos a 50 %, de forma a garantir um caudal de biogás suficiente para uma medição correta. Assim se, a válvula de ramal que queremos medir se encontra

fechada, deve-se abrir a válvula e esperar dois minutos antes de efetuar a medição da qualidade do biogás para restabelecer o correto caudal de gás. Depois de executado esta verificação preliminar, proceder à medição da qualidade do biogás mediante a cronologia lógica seguinte:

- Na figura 3-25 observa-se a localização da válvula de medição, situada próximo da válvula de ramal de cada poço e a respetiva identificação (figura 3-24). Neste exemplo, é o poço nº6 (P 6);
- Posteriormente coloca-se a peça de acoplamento estanque (figura 3-26) na válvula de medição, para permitir a adaptação da vareta do analisador de biogás;



Figura 3-24 - Identificação do poço de biogás.



Figura 3-25 - Localização da válvula de medição.



Figura 3-26 - Colocação acoplamento estanque.

- Após iniciar a colocação da vareta de medição no acoplamento, e garantido assim a estanqueidade da medição, abrir a válvula de medição e empurrar a vareta de forma a garantir a leitura de biogás no interior da conduta. A válvula de medição tem de estar totalmente aberta para possibilitar a inserção da vareta de medição (figura 3-27);



Figura 3-27 - Inserção da vareta de medição do analisador de biogás.

- Escolher o nome do poço em medição, previamente identificado, no analisador de gás (P1, PC2, P2, PC3...) com as teclas *previous* e *next* (figura 3-16) pois os resultados da medição vão ser armazenados no analisador. Depois de ter encontrado o bom número do poço no medidor de biogás, é preciso validar esta escolha ao carregar na tecla *OK*;
- Começar a medição de biogás com a tecla *pump* e esperar 60 a 100 segundos para deixar estabilizar os valores de concentrações dos gases. Carregar de novo na tecla *pump* para cessar a medição;
- Se a medição é considerada valida, carregar na tecla *store* para guardar os dados do poço considerado no analisador, senão recarregar de novo na tecla *pump* para refazer um ciclo de medição;
- Introduzir a percentagem (%) final de abertura da válvula de ramal do poço em medição (posição em que a válvula de ramal vai ficar mediante os valores dos parâmetros de qualidade do biogás (ver capítulo 3.9). Para a inserção deste valor, premer duas vezes no *OK* e inserir o valor de abertura da válvula de ramal em percentagem com o teclado do medidor (figura 3-17);
- Deve-se registar em papel (figura 3-28) todos os resultados obtidos, (folha de registos da composição do biogás) nos poços. Assim é necessário carregar duas vezes na tecla *OK* para poder visualizar os resultados relativo aos gases  $\text{CH}_4$  /  $\text{CO}_2$  /  $\text{O}_2$  /  $\text{N}_2$  (em %) e uma vez mais, ter acesso ao parâmetro  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}$  (em ppm). Por último anotar também a abertura final da válvula de ramal do poço (em %);
- Após o registo de todos os parâmetros do biogás, extrair parcialmente a vareta de medição (figura 3-29) para permitir o fecho da válvula de medição;





*Figura 3-28 - Folha de registo composição do biogás.*



*Figura 3-29 - Extração da vareta de medição do analisador de biogás.*

- Retirar totalmente a vareta de medição de biogás e remover o acoplamento da válvula de medição (figura 3-30);
- Recolocar o tampão da válvula de medição ao apertar ligeiramente com a chave específica (figura 3-31);



*Figura 3-30 - Retirar a vareta de medição e remover o acoplamento estanque.*



*Figura 3-31 - Recolocação do tampão da válvula de medição.*

- Após finalizar a medição da concentração do biogás do poço, se necessário, regular a nova posição da válvula de ramal (figura 3-32) mediante os valores medidos dos parâmetros de qualidade biogás.



*Figura 3-32 - Regulação da válvula de ramal.*

### 3.8 MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS NA CONDUTA PRINCIPAL DO CEP

Os procedimentos de medição da qualidade do biogás na conduta principal do CEP, são realizados à entrada dos motogeradores e do queimador sendo semelhantes aos praticados na medição da qualidade do biogás nos poços e que foram explicitados anteriormente, diferindo unicamente em dois pontos: é exigida a utilização dum acoplamento intermédio associado ao acoplamento especificado na medição do biogás nos poços (figura 3-33, figura 3-34 e figura 3-35) não sendo necessário a introdução do valor da percentagem de abertura da válvula de ramal. Estas diferenças explicam-se pelo fato de que a válvula de medição do biogás à entrada dos motogeradores é de dimensões diferentes, mais comprida comparando com as encontradas durante a fase de monitorização de biogás nos poços (figura 3-30). Devido à inexistência de uma válvula de regulação de caudal de biogás neste ponto, todo o biogás que chega a esta zona é queimado no CEP e / ou no queimador.



*Figura 3-33 Válvula à entrada da conduta no CEP / queimador.*





*Figura 3-34- Acoplamento intermédio para medir a concentração do biogás na conduta do CEP.*



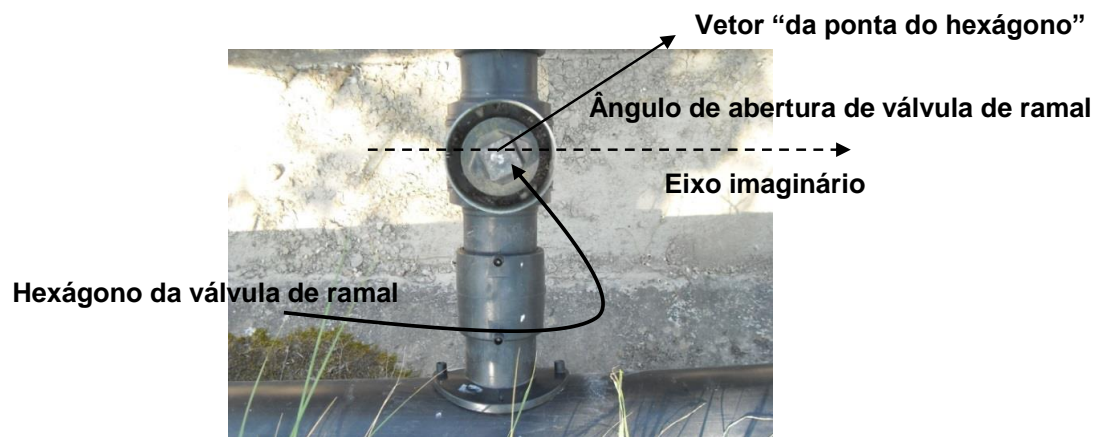
*Figura 3-35 - Vareta de medição introduzida na conduta do CEP para medir a concentração do biogás.*

### 3.9 DETERMINAÇÃO DA ABERTURA DA VÁLVULA DE RAMAL EM CADA POÇO DE BIOGÁS

Neste item especifico algumas orientações sobre o comportamento a adotar em relação ao valor de abertura (em %) a aplicar numa válvula de ramal associada a um poço e após os resultados obtidos na medição da qualidade do biogás desse mesmo poço. Antes de abordar estes critérios de decisão é importante saber a correspondência entre o valor em percentagem de abertura da válvula de ramal e o significado físico no aterro.

A referência que fornece a percentagem de abertura da válvula é a ponta do hexágono que se encontra nessa mesma válvula. Este hexágono permite rodar a válvula de ramal com a chave correspondente e informar sobre a percentagem aberta da válvula. O valor do ângulo entre a ponta do hexágono e um eixo imaginário (horizontal e

paralelo à conduta periférica passando pelo centro do hexágono da válvula de ramal) dá-nos a percentagem da válvula de ramal (figura 3-36). Assim, um valor de ângulo de  $0^\circ$  corresponde a uma abertura da válvula de 0%, isto é a válvula encontra-se completamente fechada, e ao contrário, um ângulo de  $90^\circ$  será associada a uma válvula totalmente aberta com uma abertura de 100% (figura 3-37, figura 3-38 e figura 3-39).



*Figura 3-36 - Determinação do ângulo de abertura numa válvula de ramal.*



*Figura 3-37 - Válvula de ramal fechada (0%).*



*Figura 3-38 - Válvula de ramal parcialmente aberta (50%).*



*Figura 3-39 - Válvula de ramal totalmente aberta (100%).*

Assim, a percentagem de abertura da válvula de ramal vai ser o resultado da análise da combinação de várias considerações em relação às concentrações de gases medidas nos poços de biogás da tabela 3-3.

*Tabela 3-3 - Resumo para a avaliar qual a percentagem de abertura a aplicar na válvula de ramal do poço em estudo.*

Parâmetro avaliado num poço	Importância em relação à valorização energética	Critério de avaliação	Efeito na válvula em relação a secção de passagem do biogás
CH <sub>4</sub> (%)	Elevada	Inferior a 55%	Reduz
		Entre 55 a 56%	Manter
		Superior a 56%	Aumentar
O <sub>2</sub> (%)	Elevada	Inferior a 0,1%	Aumentar
		Superior a 0,1%	Reduzir
N <sub>2</sub> (%)	Pequena	Inferior a 1%	Aumentar
		Superior a 1%	Reduzir
H <sub>2</sub> S (ppm)	Pequena	Entre 0 a 200 ppm	Aumentar
		Superior a 200 ppm	Reduzir

A decisão de abertura ou encerramento de uma válvula não é simples, devido aos critérios de avaliação, muitas vezes ser contrários aos considerados na decisão da

posição da válvula de ramal. Por exemplo, ter uma concentração de metano de 57% e uma concentração de oxigénio ligeiramente superior a 0,3%. Nesta situação cabe ao técnico que realiza a medição de biogás tomar uma decisão mediante a qualidade de biogás dos outros poços, a sua experiência no ASVC (parâmetro decisivo na tomada da boa decisão mas extremamente subjetivo), a resolução do problema de oxigénio do poço em medição (fechar válvula de ramal para fazer a manutenção neste poço) e sobretudo função dos parâmetros, no dia da medição, da qualidade do biogás na entrada do CEP que vai diretamente influenciar a produção de eletricidade. Um outro exemplo que pode ser abordado é a existência de níveis elevados de  $H_2S$  (superior a 1000 ppm) e uma percentagem de  $O_2$  ligeiramente elevada (por exemplo 0,4%), assim temos uma indecisão entre abrir o poço, de forma a tentar reduzir o odor emitido, ou fechá-lo por causa da elevada concentração de oxigénio.

A vasta experiência do técnico que realiza as medições da qualidade do biogás em termos de histórico dos problemas encontrados nos poços, da deposição dos Resíduos Urbanos (RU) e sobre a sensibilização da importância da qualidade do biogás na alimentação em combustível dos motores.

Há a realçar dois pontos importantes:

- A posição da válvula de ramal de um poço é função dos parâmetros de qualidade do biogás neste poço mas também função da qualidade do biogás na globalidade do aterro, isto é, na entrada dos motores;
- A experiência ou “*know-how*” do técnico que realiza as medições de qualidade do biogás em termos de histórico dos problemas encontrados nos poços, da deposição dos RU e sobre a sensibilização da importância da qualidade do biogás na alimentação em combustível dos motores.

Outro parâmetro que vai influenciar a posição da válvula de ramal é a depressão neste ponto. Assim é conveniente ter uma depressão equilibrada em todos os pontos de captação do aterro sanitário, isto é, a mesma depressão em todas válvulas de ramais. Este fator pode fazer com que, mesmo em poços muito bons no que se refere à qualidade do biogás e que à partida estariam abertos a 100%, a abertura da válvula esteja situado nos 50%, por exemplo, de forma a garantir uma depressão equilibrada nos poços.

### 3.10 BOAS PRÁTICAS NA MEDIÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS

Alguns dos aspetos mais relevantes para realizar uma boa medição da qualidade do biogás nos poços são:

- Esperar o tempo necessário na realização da medição (sempre superior a um minuto);
- Observar a presença de ruturas ao nível das condutas de biogás (entrada de ar);
- Verificar se, na conduta periférica como nas secundárias, os condensados são bem evacuados, isto é, evitar tampões hidráulicos que impeçam a captação de biogás;
- Antes de efetuar uma campanha de medição da qualidade do biogás, verificar o bom estado do equipamento.

### 3.11 MONITORIZAÇÃO DA DEPRESSÃO DO BIOGÁS DO ASVC

A rede de biogás do ASVC sofre uma depressão, causada pelo compressor da CEP e do queimador, de 50 mb. No entanto, os valores de depressão de biogás ao nível dos poços, precisamente nas válvulas de medição da qualidade do biogás, são muitos baixos, na ordem de algumas unidades milibar. O ideal seria que as depressões, nos diferentes pontos (para os poços que não têm a válvula de ramal fechada) seja semelhante, de forma a assegurar uma aspiração equilibrada em todo o aterro e assim garantir que uma grande parte do volume aterro participe no fornecimento do biogás. Assim, é importante controlar a depressão nos diferentes poços, embora não seja necessário com a regularidade da qualidade do biogás.

### 3.12 METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES DA DEPRESSÃO DO BIOGÁS NO ASVC

O material de medição da depressão do biogás utilizado na RESULIMA é um manómetro analógico de precisão, com uma gama de medição de 0 até -60 mb (figura 3-40).



*Figura 3-40 - Manómetro para medir a depressão do biogás.*

A metodologia para medir a depressão do biogás consiste em retirar o tampão da válvula de medição, localizada próximo da válvula de ramal. Seguidamente posiciona-se o manómetro com o seu acoplamento específico com a válvula sempre fechada (figura 3-41). É necessário verificar o bom contato da junta de estanqueidade do acoplamento na válvula de medição, para garantir uma boa medição de depressão do biogás;

Depois de confirmar a estanqueidade do circuito de medição, abrir a válvula de medição (figura 3-42) e apontar o valor da depressão de biogás, neste exemplo a depressão é de -1 mb.



*Figura 3-41- Colocação do manómetro.*



*Figura 3-42 - Abertura da válvula para medição da depressão.*

Para retirar o manómetro devemos proceder de forma inversa e ter em atenção que a válvula de medição se encontra fechada antes de remover o manómetro.

### 3.13 MONITORIZAÇÃO DA TEMPERATURA DO BIOGÁS DO ASVC

De forma a evitar a introdução de ar dentro da conduta de biogás ou a saída do mesmo para a atmosfera, durante a medição da temperatura, adaptou-se uma rolha

de cortiça (figura 3-43). Também a medição da temperatura foi feita nas válvulas de medição, situadas à beira das válvulas de ramais. Apesar de as válvulas de medição situadas perto dos poços serem as mais indicadas para medir as temperaturas no interior do aterro, visto que o trajeto percorrido pelo biogás em condutas é menor, o nosso sensor de temperatura era curto demais para atingir o seu centro, pelo que optou-se por medir as temperaturas unicamente nas válvulas de medição situadas perto das válvulas de ramais. No decorrer deste trabalho realizou-se uma campanha de medição, por forma a determinar as temperaturas de biogás em cada poço. Para isso foi utilizado um sensor de temperatura digital da ESTG, assumindo que esta medição nos forneceu uma temperatura aproximada do interior do aterro.



*Figura 3-43 - Adaptador de cortiça para a medição da temperatura do biogás nos poços do ASVC.*

### 3.14 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO BIOGÁS

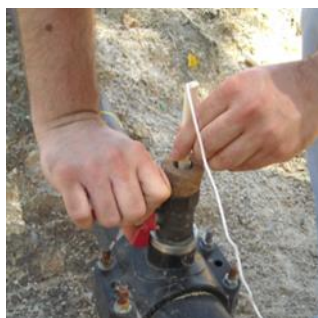
A metodologia que usei para medir a temperatura do biogás nas válvulas de medição foi a seguinte:

- Após a retirada do tampão da válvula de medição, incorpora-se o adaptador do sensor de temperatura, com a válvula de medição sempre na posição “fechada” (figura 3-44);
- Iniciar a introdução do sensor de temperatura no adaptador, mantendo a válvula de medição fechada (figura 3-45);
- Abrir a válvula de medição e introduzir ao máximo o sensor de temperatura para que a sua ponta se situe no centro da conduta secundária (figura 3-46);





*Figura 3-44- Colocação do adaptador do sensor de temperatura.*



*Figura 3-45 - Abertura da válvula de medição.*



*Figura 3-46 - Medição e validação do resultado*

- Deixar estabilizar a medição durante 60 segundos e registar o resultado;
- Para continuar a monitorização da temperatura do biogás num outro poço, deve-se proceder de forma inversa à da instalação do sensor de temperatura.

### 3.15 O CENTRO ELETROPRODUTOR (CEP) DO ASVC

Numa perspetiva sensibilizadora em exposições, seminários, workshops e visitas de estudo, construiu-se uma maquete pedagógica à escala do CEP para mostrar toda a temática relacionada com a produção de energia elétrica com origem na deposição de RU (figura 3-47).



*Figura 3-47 – Maquete do CEP.*

#### 3.15.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

As tecnologias convencionais são consideradas por grande parte das entidades responsáveis por aterros sanitários como sendo as mais adequadas para a valorização energética do biogás, entre as quais, encontramos os motores de combustão interna segundo o ciclo Otto. Os motores Otto operam através da



combustão de uma mistura de ar atmosférico e injeção de combustível, sendo o biogás captado no aterro o combustível a ser utilizado no processo de combustão interna. Este processo envolve várias etapas, tais como, a compressão da mistura ar combustível no interior dos cilindros, combustão da mistura mediante uma descarga elétrica e exaustão dos gases de escape ou gases de combustão (Deublein e Steinhauser, 2008). As principais vantagens de se utilizar esta tecnologia residem no baixo custo de instalação, na facilidade de operação e de manutenção dos equipamentos, bem como numa eficiência significativa para potências na ordem das centenas de kW. O pequeno porte e a facilidade de operação possibilitam uma instalação de pequenas dimensões, além de que a instalação de novos motores é viável no caso do aumento do biogás produzido no aterro sanitário (Deublein e Steinhauser, 2008). Obter uma eficiência significativa destes equipamentos através da operação deste tipo de tecnologia permite obter outra rentabilidade, visto os gases de escape apresentarem uma entalpia considerável. Esta entalpia excedente pode ser usada em sistemas de cogeração. O aproveitamento deste calor permite a produção de energia elétrica através de um gerador elétrico, bem como, a produção de águas quentes ou vapor de baixa pressão (Deublein e Steinhauser, 2008).

### 3.15.2 MANUTENÇÃO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Desde a entrada em funcionamento do CEP, existe um histórico de ocorrências de avarias relevantes, com custos consideráveis e paragens prolongadas dos MTG. Assim, a RESULIMA possui um plano de manutenção preventivo específico dos MTG do CEP, o qual se subdivide em dois momentos:

Num primeiro momento, realiza-se:

- Mudança de óleo de lubrificação, filtros a cada 2000 horas para o MTG nº 1 e 1500 horas para o MTG nº 2;
- Afinação de todas as válvulas admissão e escape;
- Testes de funcionamento após a intervenção;
- Relatórios finais da intervenção e funcionamento dos equipamentos para efeitos de garantia.

Num segundo momento, a cada 12000 horas, realiza-se:

- Substituição de todos os pistões, camisas, seguemientos, juntas e orrings do MTG;
- Mudança de óleo de lubrificação;
- Afinação de todos os parâmetros associados ao bom funcionamento dos equipamentos;
- Testes de funcionamento após a intervenção;
- Relatórios finais da intervenção e funcionamento dos equipamentos para efeitos de garantia.

Seguidamente, apresenta-se sucintamente através da tabela 3-4 os danos causados nos equipamentos em função dos parâmetros que compõe o biogás.

*Tabela 3-4 – Resumo dos danos causados nos equipamentos em função de cada parâmetro do biogás.*

Componente	Efeito
CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Baixa o poder calorífico</li><li>-Aumenta o número de metano e as propriedades antidetonante dos motores</li><li>-Causa a corrosão (baixa concentração ácido carbónico) se o gás está húmido.</li><li>-Danifica as células de combustível alcalóides.</li></ul>
N <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"><li>-Tem um efeito corrosivo em equipamentos e sistemas de canalização (corrosão); muitos fabricantes de motores portanto, definem um limite máximo.</li><li>-Danifica os catalisadores</li></ul>
Vapor de água	<ul style="list-style-type: none"><li>-Causa a corrosão dos equipamentos e sistemas de canalização</li><li>-Os condensados danificam instrumentos e motores</li><li>-Risco de congelamento dos sistemas de canalização e dos injetores</li></ul>
Poeiras	<ul style="list-style-type: none"><li>-Bloqueia injetores</li></ul>
N <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Baixa o poder calorífico</li><li>-Aumenta as propriedades antidetonante dos motores</li></ul>

### 3.15.3 CARATERIZAÇÃO DO CEP

O Centro Eletroprodutor (CEP) do ASVC produz a energia elétrica utilizando como combustível o biogás produzido pelo aterro. Inicialmente, o ASVC optou pela queima

do biogás através de três queimadores localizados à volta da área da célula de deposição, os quais foram desativados após o arranque da exploração do CEP. Atualmente o CEP é constituído por dois motogeradores (MTG) de combustão interna, instalado em contentores (figura 3-48 e figura 3-49), com potências unitárias de 1.200 kW e 800 kW, totalizando 2 MW de potência elétrica gerada sob tensão de 400 V, onde 97% desta energia elétrica é vendida e introduzida, por intermédio de um transformador 400 – 15000 V, na rede do Serviço Elétrico Público (SEP) sendo que os restantes 3% destinam-se ao auto consumo dos dois grupos electroprodutores e os respetivos periféricos elétricos.



*Figura 3-48 - Vista dos dois contentores onde estão instalados os MTG (contentor da esquerda, 800 kW e o contentor da direita, 1200 kW).*



*Figura 3-49 - Vista do MTG 1200 kW.*

Na tabela 3-5 encontram-se as características principais dos dois motogeradores.

*Tabela 3-5 - Características técnicas principais dos motogeradores do CEP do ASVC.*

Equipamento	Marca / Modelo	Caraterísticas	
Motogerador nº1	MWM / TCG 2020 V12	Potência (kW)	1.200
		Energia produzida a 100% da carga (kWh)	1.200
		Rendimento (%)	42
		Autoconsumo (% da produção)	3 a 4
Motogerador nº2	MWM / TCG 2016 V16	Potência (kW)	800
		Energia produzida a 100 % da carga (kWh)	800
		Rendimento (%)	42
		Autoconsumo (% da produção)	3 a 4

A tecnologia usada no CEP é recente, o que permite ter muitas informações sobre o estado dos MTG em tempo real, via computador, dos parâmetros de controlo do motor e de produção de eletricidade (figura 3-50).



*Figura 3-50 - Quadro Elétrico (QE) de controlo de produção de eletricidade do MTGnº1.*

Associado ao CEP encontra-se um queimador de tecnologia recente (figura 3-51), respeitando as normas de emissões de gases atuais, com capacidade para queimar 1000 Nm<sup>3</sup>/h de biogás nos casos em que ocorra produção de biogás que exceda a capacidade de consumo do CEP e para assegurar o tratamento do biogás nos períodos de paragem de um ou dos dois motogeradores por causas de manutenções ou avarias.

No princípio básico que é sempre melhor valorizar o biogás em vez de o queimar, verifica-se excesso de produção de biogás (cerca 170 Nm<sup>3</sup>/h), que tem de ser incinerado. Atualmente já foi autorizado pela Direção Geral de Energia e Geologia a instalação do terceiro MTG, eventualmente igual ou menos potente, comparando com

os que já se encontram instalados e em pleno funcionamento. Assim, evita-se a queima de biogás em detrimento da respectiva valorização energética e simultaneamente, é possível aumentar os intervalos de tempo para as manutenções periódicas preventivas dos MTG (aproximadamente 12 000 horas de trabalho).



*Figura 3-51 - Queimador associado ao CEP.*

Na valorização energética do biogás de aterro, os motores de combustão interna, habitualmente, utilizados são os motores de explosão, contudo é necessário uma monitorização e acompanhamento técnico continuado na sua gestão, visto que, este tipo de sistemas está sujeito a uma constante variação da composição do biogás proveniente de AT. Esta dificuldade tem origem na variação da concentração de metano no biogás, afetando diretamente o índice de metano do biogás e dificultando a previsão da temperatura de autoignição do biogás e a consequente determinação da razão de compressão a aplicar no motor. Atualmente, já existem motores de explosão para biogás que atingem os 4,3 MW, potência, a qual, até há pouco tempo, só poderia ser obtida com recurso a turbinas a gás.

Um dos mais importantes fabricantes de motores a biogás neste ramo de atividade é a MWM da antiga DEUTZ que, atualmente possui uma gama de motores com as potências descritas na tabela 3-6.

Tabela 3-6 - Motores a biogás MWM em funcionamento no CEP.

TCG	Motor	Potência [kW]
2016	V8	400
	V12	600
	V16	800
2020	V12	1200
	V16	1560
	V20	2000
2032	V12	3333
	V16	4300

#### 3.15.4 UNIDADE DE PRE-TRATAMENTO (DESUMIDIFICAÇÃO) DO BIOGÁS

Como referido anteriormente, o biogás, além de metano, contém dióxido de carbono, vapor de água e pequenas quantidades de outros gases, os quais são potencialmente nocivos ao longo do processo de combustão em motores de combustão interna. No biogás utilizado para produção de energia elétrica e térmica, o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) e siloxanos devem ser eliminados. Se não for controlada a nível de concentração de siloxanos, pode causar graves danos às válvulas, pistões, anéis, cabeçotes, velas e turbocompressores, o que significa um aumento no custo de serviços de manutenção e peças sobressalentes. Outra consequência da alta concentração de siloxanos no biogás é a necessidade de mudanças de óleo mais frequentes nos equipamentos, para impedir a sua acumulação nos lubrificantes utilizados.

A escolha e o dimensionamento dos dispositivos para tratamento do biogás dependem das quantidades a serem tratados, mas, sobretudo, das características do combustível. Uma desumidificação eficaz melhora o poder calorífico do biogás e a sua combustão. Além disso, o arrefecimento do biogás a um nível inferior à temperatura de condensação comporta uma substancial eliminação do  $H_2S$ . Impulsionar a desumidificação até quase 0 °C purifica o biogás com eficácia, de maneira a não poluir o óleo de lubrificação. Todavia, é suficiente chegar a 5 °C, para reduzir o conteúdo de umidade até 5 g/Nm<sup>3</sup>. Na prática, o desumidificador é um permutador de calor seguido por um circuito refrigerador onde o fluido de arrefecimento escorre graças a uma bomba específica. Fazem parte do sistema apresentado pela figura 3-52, a necessária alimentação elétrica, além de uma linha de escoamento da condensação devido às quantidades de água não desprezíveis, sendo necessário providenciar o respetivo encaminhamento para posterior tratamento ou recirculação.





*Figura 3-52 - Unidade de desumidificação (pré-secagem do biogás).*

Os fabricantes de motogeradores estabeleceram limites para esta classe de poluentes, para efeitos de garantia.

No desenvolvimento de tecnologias de limpeza biogás, vários métodos têm sido utilizados para reduzir os efeitos de depósitos de silício nas máquinas utilizadas para aterros:

- Sistemas de injeção de fluidos de limpeza, permitindo suavizar esses depósitos para decapagem posterior. Porém, a longo prazo é preferível evitar que os siloxanos alcancem os equipamentos para evitar a formação destes depósitos;
- Sistemas de filtro de carvão ativado do poluente por um período finito, ocupar um grande espaço (que geralmente requer a permissão de planeamento), constituem um risco operacional para acumular uma quantidade considerável de gás pressurizado;
- Atualmente no mercado derivados de carvão ativado e de gel de sílica como um cartucho ou oferecidos silos, para fácil substituição e eliminação. Embora as tarefas facilitem a substituição do meio filtrante e aumentem a segurança operacional, são caros e requerem manutenção constante;

- Sistemas de tratamento térmico e de osmose inversa originam resultados com investimentos comparativamente muito maiores em comparação com outros sistemas, e condições de operacionalidade elevados devido ao elevado consumo de energia.

Como já foi referido anteriormente, a humidade é removida por arrefecimento do fluxo de biogás, a fim de obter a condensação, do que pode então ser separado, recolhido e evacuado. O sistema utiliza arrefecimento a ar e água através de um permutador de calor com água e biogás. Os dois componentes estão interligados por um circuito de recirculação de água Glicol.

### 3.16 METODOLOGIA DA MODELAÇÃO (3D) DA CELULA DE DEPOSIÇÃO

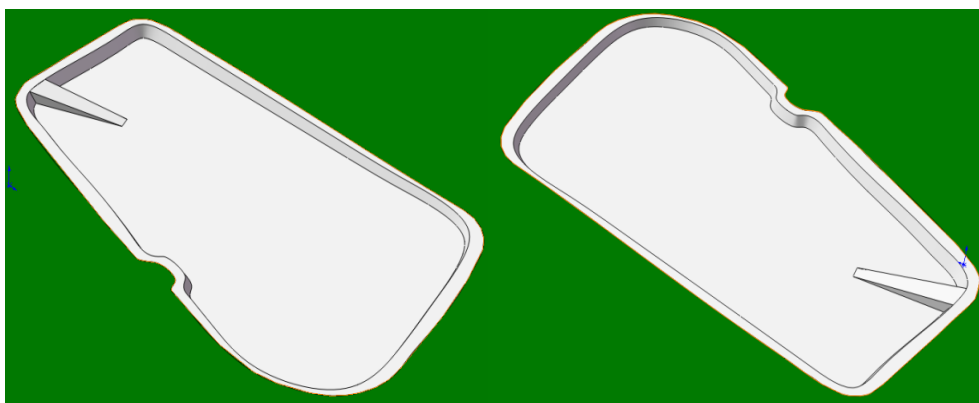
A modelação tridimensional da célula de deposição do ASVC constituiu um desafio com o objetivo de melhorar e entender a evolução dinâmica do AT em função da antiguidade dos resíduos depositados com base nos levantamentos topográficos datados, realizados de seis em seis meses. A modelação 3D, foi realizada com o software *Autodesk Autocad 2015 e Autodesk Inventor Professional 2015*. A RESULIMA forneceu todas as plantas a duas dimensões (2D), realizadas em *Autocad*, a partir dos levantamentos topográficos (32 levantamentos realizados a 2D até à data em que decorreu este trabalho), onde constava uma planta das células de deposição do aterro sanitário com as respectivas cotas (anexo 1) e os perfis dos cortes do aterro distanciados entre si em 10 metros (anexo 2). Devido à inexistência de levantamentos a 3D em posse da Resulima, tentou-se junto da empresa que efetuou os levantamentos recuperar alguns elementos recolhidos durante a execução dos referidos levantamentos topográficos com a utilização de uma estação total (equipamento tridimensional – “Leica geosystems TPRS 1200”). Perante a impossibilidade de recuperação dos dados recolhidos anteriormente a 2D, modelou-se uma malha superficial a 3D referente aos últimos três levantamentos topográficos efetuados.



## 4 RESULTADOS

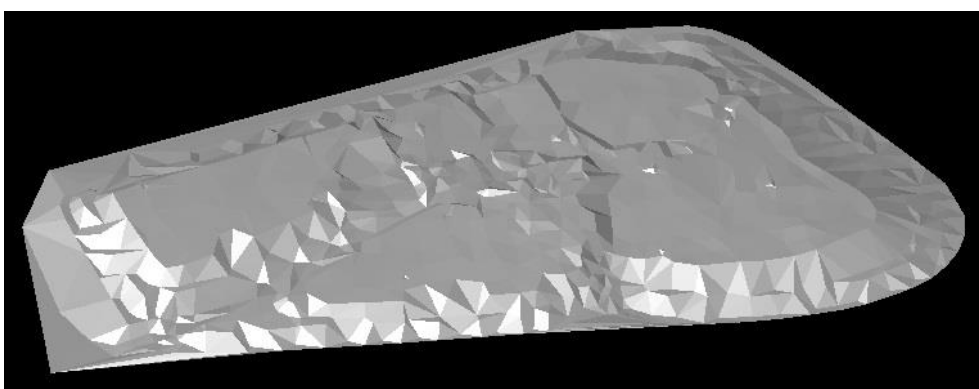
### 4.1 MODELAÇÃO TRIDIMENSIONAL DA CÉLULA DE DEPOSIÇÃO

Seguidamente, na figura 4-1, apresenta-se a modelação tridimensional da célula vazia, na qual estão a ser depositados os RU desde o arranque da sua exploração até ao presente momento.



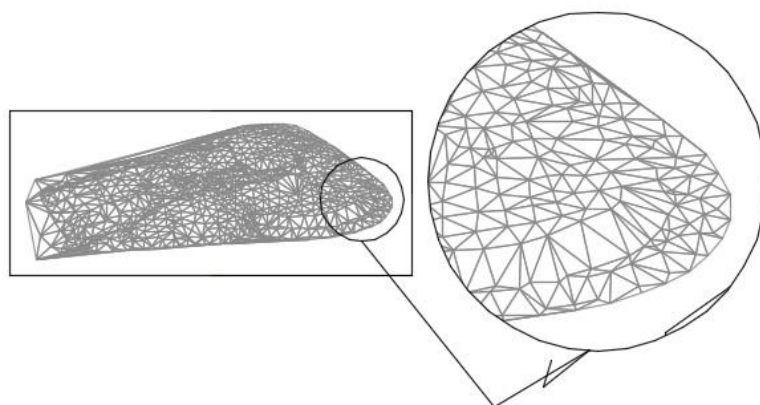
*Figura 4-1 – Vista 3D da célula de deposição RU vazia do ASVC.*

Os dados recolhidos pela estação total dos diversos pontos são transformados automaticamente numa malha triangular em forma de superfície, como pode ser verificado na figura 4-2 e figura 4-3.

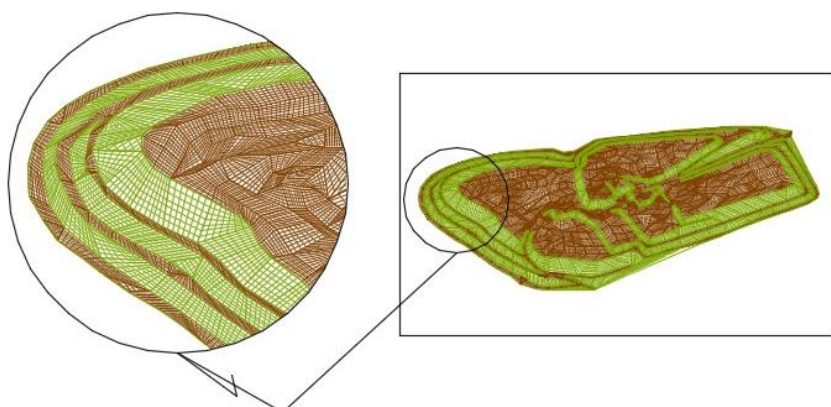


*Figura 4-2 - Vista 3D do levantamento executado pela estação total Leyca geosystems TPRS 1200.*

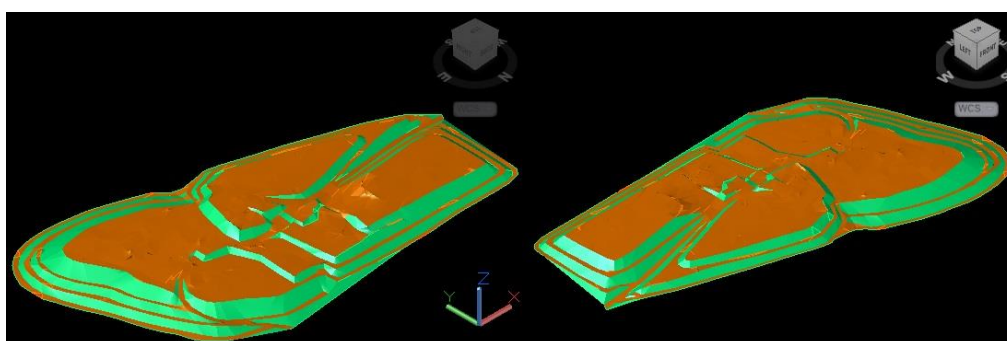
Atendendo que a malha proveniente do levantamento topográfico (LT) não permite uma noção real da forma do AS, transformou-se os pontos recolhidos pela estação total em cada levantamento topográfico em diversas superfícies tetraédricas demonstrado na figura 4-4 e figura 4-5 referente à modelação do ASVC.



*Figura 4-3 - Detalhe da malha planar triangular do ASVC da superfície fornecida pela Estação Total “Leyca Geosystems”.*

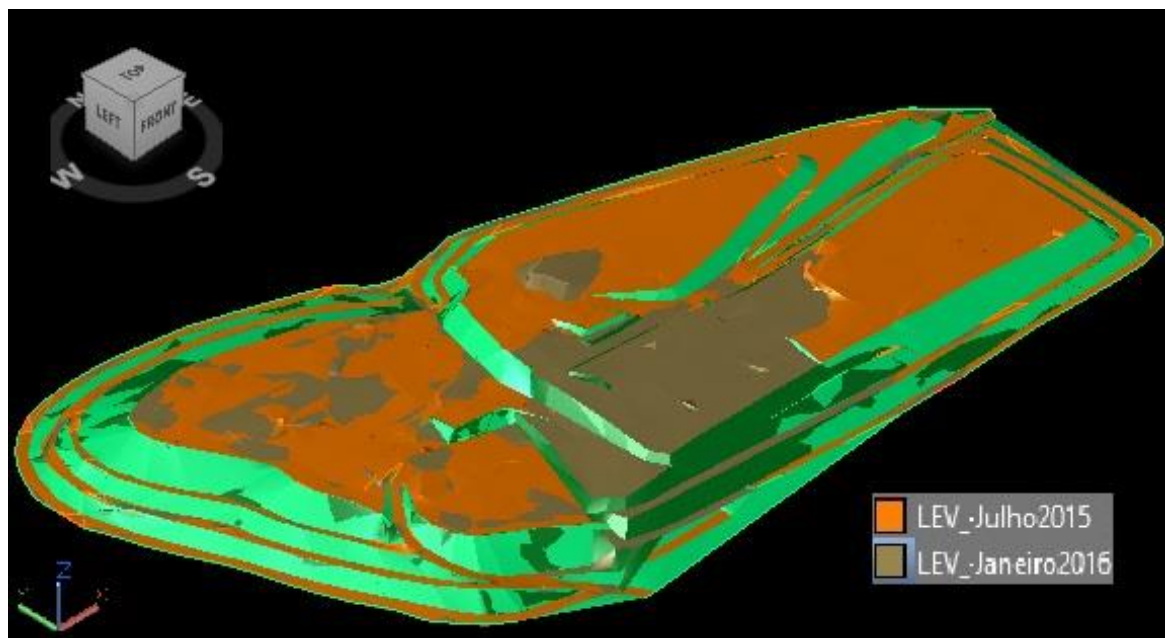


*Figura 4-4 – Detalhe da malha tetraédrica do ASVC da superfície modelada 3D.*



*Figura 4-5 - Vista 3D da deposição de RU referente ao levantamento topográfico, em 05/07/2015.*

Na figura 4-6 observa-se a evolução da deposição de RU no ASVC comparativamente à modelação 3D do LT anterior ocorrido em 5 de julho de 2015.



*Figura 4-6 - Evolução da deposição de RU no ASVC referente aos dois últimos levantamentos topográficos.*

A modelação em 3D permite determinar a idade dos resíduos por camadas, o que é útil para a determinação dos volumes após a compactação, confrontando com os mesmos volumes na entrada, por diferença de idades das camadas em análise. Com esta operação, determina-se a taxa real de compactação, massa volúmica (tabela 4-1).

*Tabela 4-1- Volume real de compactação de RU no ASVC.*

Designação / DATA	Massa Volumica (m3)	Massa Volúmica Acumulada (m3)
LT Janeiro / 2015	49 051,20	1 502 098,30
LT Julho / 2015	27 375,60	1 529 473,90
LT Janeiro / 2016	30 970,90	1 560 444,80

## 4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Um dos fatores para o aproveitamento do biogás é devido ao seu maior constituinte, o metano, ser um combustível. Desta forma, a sua produção em aterros sanitários tem sido estudada exaustivamente, e diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos por forma a prever a quantidade de biogás ou metano produzido. No caso do ASVC tem sido utilizados diversos modelos, sendo um dos mais conhecidos o *LandGEM* (Landfill Gas Emissions Model), desenvolvido pela Agência Americana de Proteção do Ambiente (USEPA), em inglês U.S. *Environmental Protection Agency*, segundo a definição do próprio guia, uma ferramenta com interface Microsoft Excel, que serve para estimar as taxas de produção dos vários gases emitidos num aterro. O *LandGEM* é constituído por nove folhas de cálculo, sendo que a primeira apresenta uma sumula das diferentes funções que cada folha de cálculo possui e algumas notas importantes sobre o *LandGEM*, como se pode ver seguidamente na figura 4-7.

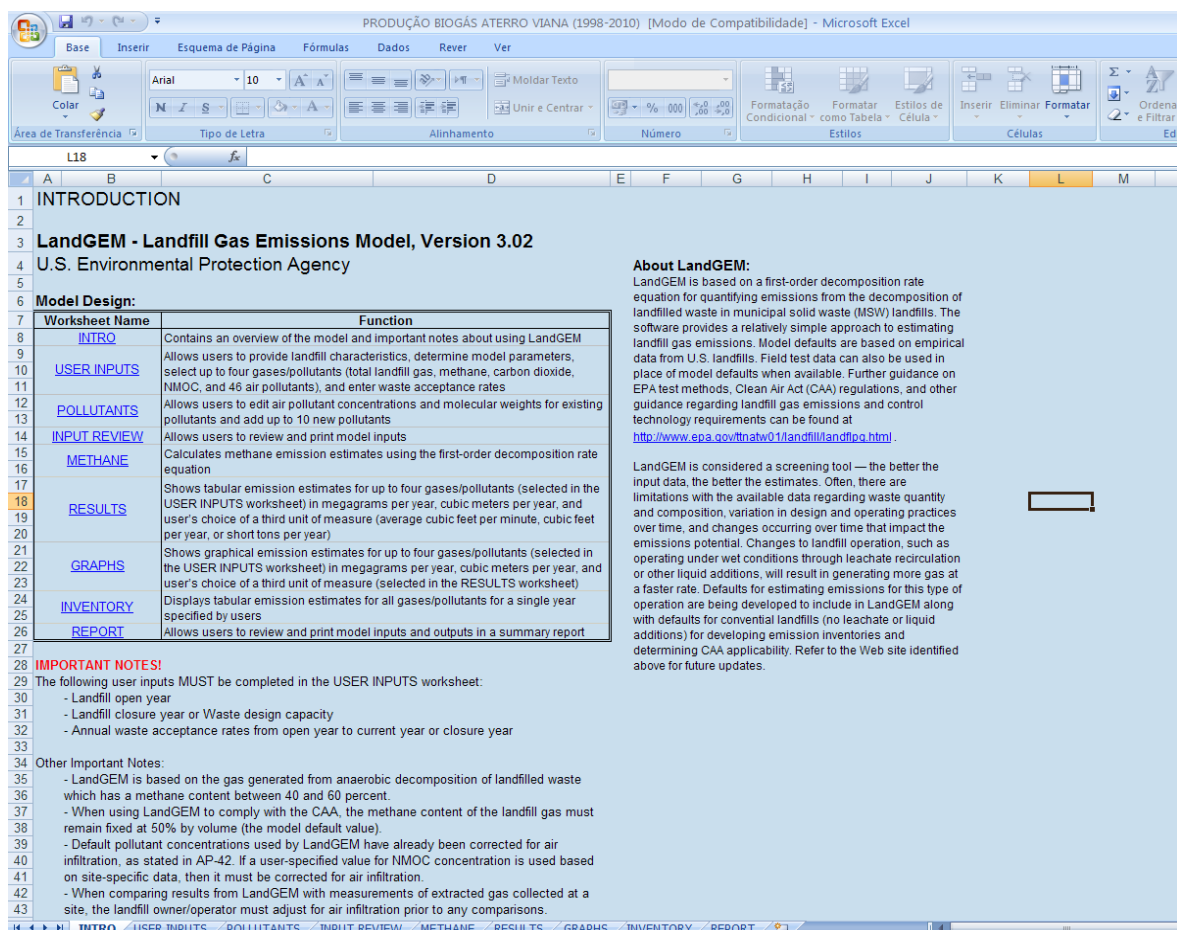


Figura 4-7 – Resumo sobre a utilização do software "LandGEM".

Há a salientar que o *LandGEM* utiliza uma fórmula matemática de primeira ordem, conforme *equação 1* a seguir apresentada, para estimar a quantidade de metano produzida.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_o \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

*Equação 1 - Equação utilizada pelo "LandGEM".*

Onde:

- $Q_{CH_4}$  = produção anual de metano no ano de cálculo ( $m^3$ /ano);
- $i$  = tempo de incremento de um ano;
- $n$  = (ano de cálculo) - (ano inicial de aceitação de resíduos);
- $j$  = tempo de incremento de 0.1 anos;
- $k$  = taxa de produção de metano ( $ano^{-1}$ );
- $L_o$  = capacidade potencial de produção de metano ( $m^3$ /Mg);
- $M_i$  = massa de resíduos aceite no ano  $i$  (Mg);
- $t_{ij}$  = ano da secção  $j$ , da massa de resíduos  $M_i$ , aceite no ano  $i$  (anos decimais como por exemplo 3,2 anos).

Na folha de cálculo "*user inputs*" são colocadas todas as informações relevantes sobre as características do aterro, como a sua identificação, dimensões, anos de abertura e de encerramento, a possibilidade de seleccionar a opção do cálculo, pelo modelo, do ano de encerramento e a capacidade de resíduos, como pode observar na figura 4-8.

USER INPUTS		Landfill Name or Identifier: Aterro Sanitário de Vila Fria, Viana do Castelo
1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS		Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections
Landfill Open Year	1998	
Landfill Closure Year	2014	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity		
		megagrams ▼

*Figura 4-8 - Introdução de dados sobre as características do aterro.*

Nesta folha de cálculos são também indicados os diferentes parâmetros utilizados na



modelação como a taxa de produção de metano  $k$ , o potencial de produção de metano, as concentrações dos Compostos Orgânicos não metanico (**NMOC**) e a proporção de metano no biogás, representados na figura 4-9.

Figura 4-9 - Introdução de dados sobre os parâmetros da modelação do aterro.

Estes parâmetros podem ser fornecidos pelo programa, com base em dados estatísticos, ou inseridos de acordo com as indicações do utilizador. Assim a taxa de produção de metano, que incide sobre quatro fatores, sendo eles a quantidade de humidade da massa de resíduos, a disponibilidade de nutrientes para os micro-organismos produtores de metano e dióxido de carbono, do pH e temperatura da massa de resíduos. Também deve ser tido em conta que quanto maior for o valor de  $k$  mais rapidamente se dá o crescimento e posterior decrescimento da taxa de produção de metano. No caso do aterro da RESULIMA o valor obtido para  $k$  foi o de 0,05. Este valor foi obtido empiricamente, ou seja inicialmente calculou-se quanto metano era efetivamente produzido, sendo este valor obtido através das entradas registadas nos motogeradores e/ou queimadores. Assim com o total do biogás introduzido no sistema através de uma sucessão de tentativas e erros obteve-se o  $k$  que se aproximava do valor de 0,05. Em suma o valor de 0,05 é aquele que permite uma produção de metano igual ao que foi registada nos motogeradores e/ou queimadore.

O valor de  $L_0$  depende das características iniciais dos resíduos depositados no aterro, assim quanto maior for a quantidade de celulose dos resíduos depositados maior será o valor de  $L_0$ . No caso da RESULIMA o valor obtido foi de 100, sendo a explicação deste valor desenvolvida posteriormente nesta dissertação.

A indicação da concentração de metano no biogás deverá ser compreendida entre os 40 e os 60%, pois a equação utilizada na decomposição de resíduos, fora desta gama de valores, poderá fornecer dados errados. Este parâmetro vem previamente definido

com o valor de 50, ou seja o biogás seria constituído por 50% (em volume) de metano e os restantes 50% seriam o dióxido de carbono e restantes gases. No entanto, o programa prevê a possibilidade de ser introduzido o valor medido localmente. No caso da RESULIMA, foi inserido o valor de 59%, pois é a concentração média de metano na produção de biogás, obtido na monitorização bissemanal do biogás do aterro.

Também nesta folha de cálculo são indicadas as preferências do utilizador em termos de gases a serem modelados posteriormente, como se pode ver na figura 4-10.

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1 Default pollutant parameters are currently being used by model.

Total landfill gas

Gas / Pollutant #2

Methane

Gas / Pollutant #3

Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4

NMOC

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

Figura 4-10 - Introdução dos gases na modelação.

É possível escolher até um máximo de 4 gases a serem modelados ao mesmo tempo, sendo a escolha destes efetuados na célula. O *LandGEM* está predisposto a trabalhar com uma percentagem de 50% de metano, contudo caso o parâmetro quantidade de metano seja alterado o programa altera também o peso molecular da totalidade das emissões gasosas do aterro, fornecendo assim os dados corretos.

Na primeira folha de cálculo são também introduzidos a massa de resíduos aceite em cada ano de funcionamento do aterro, como se pode observar na tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Massa de RU depositados no ASVC.

**4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES**

Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
1998	2 509	2 760
1999	61 220	67 342
2000	104 760	115 236
2001	108 883	119 771
2002	116 744	128 418
2003	121 657	133 823
2004	123 797	136 177
2005	128 069	140 876
2006	132 659	145 925
2007	131 804	144 984
2008	132 366	145 603
2009	133 080	146 388
2010	133 888	147 277
2011	120 856	132 942
2012	116 644	128 308
2013	116 060	127 666
2014	119 164	131 080
2015		

O modelo permite a inserção de 80 anos de dados de resíduos, o que é bastante confortável para quase todas as situações conhecidas de aterros, cuja vida útil é muito inferior em relação a esta limitação. O caso da RESULIMA o aterro está a laborar há quase 17 anos e o encerramento está previsto para 2018 (figura 4-11).



**USER INPUTS** Landfill Name or Identifier: Aterro Sanitário de Vila Fria, Viana do Castelo

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year: 1998  
 Landfill Closure Year: 2014  
 Have Model Calculate Closure Year: ☒ Yes ☐ No  
 Waste Design Capacity: megagrams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate,  $k$  ( $\text{year}^{-1}$ ): User-specified value: 0.050  
 Potential Methane Generation Capacity,  $L_0$  ( $\text{m}^3/\text{Mg}$ ): User-specified value: 100  
 NMOC Concentration (ppmv as hexane): CAA - 4,000  
 Methane Content (% by volume): User-specified value: 59

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1: Total landfill gas  
 Gas / Pollutant #2: Methane  
 Gas / Pollutant #3: Carbon dioxide  
 Gas / Pollutant #4:

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: Mg/year

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Unit (short tons/year)
1998	2 509	2 760
1999	61 220	67 342
2000	104 760	115 236
2001	108 883	119 771
2002	116 744	128 418
2003	121 857	133 823
2004	123 797	136 177
2005	128 069	140 876
2006	132 659	145 925
2007	131 804	144 984
2008	132 366	145 603
2009	133 080	146 388
2010	133 888	147 277
2011	120 856	132 942
2012	116 644	128 308
2013	116 060	127 666
2014	119 164	131 080
2015		
2016		
2017		
2018		
2019		

INTRO USER INPUTS POLLUTANTS INPUT REVIEW METHANE RESULTS GRAPHS INVENTORY REPORT

Figura 4-11 - Folha de cálculo "user inputs".

O software do *LandGEM* disponibiliza de seguida uma vasta gama de informações sobre os poluentes, um resumo dos dados de entrada, a quantidade de metano estimada, os resultados obtidos e respetivos gráficos, um inventário e um relatório final.

De toda esta informação disponível, a mais relevante é a que se obtém na folha de cálculo dos resultados, especialmente a referente à totalidade dos gases emitidos no aterro, isto é o biogás. Assim, tal como se pode observar na tabela 4-3, podemos determinar que para o ano de 2014 temos uma produção total de  $1,09 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

Este é convertido em caudal horário teórico ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) em  $1244,29 \text{ m}^3/\text{h}$  para o ano de 2014. Desta forma, como a capacidade máxima dos motores é de cerca de  $1100 \text{ m}^3/\text{h}$ , a diferença de produção do biogás, aproximadamente  $145 \text{ m}^3/\text{h}$ , será queimado pelo queimador e uma fração será difundido na atmosfera através do topo. Esta é a distribuição teórica.

No entanto, da análise dos dados de biogás medidos e consumidos pelos motogeradores e pelo queimador, o valor é de 6 729 520 m<sup>3</sup> biogás, o que indicia que cerca de 38% do biogás potencialmente produzido escapa para a atmosfera pelo topo do aterro, constituindo uma preocupação ambiental, devido ao seu efeito nefasto para a camada de ozono.

Em anexos são apresentadas as folhas de cálculo restantes.

Tabela 4-3 – Resultados referentes ao biogás gerado no aterro de Viana do Castelo.

RESULTS		Landfill Name or Identifier: Aterro Sanitário de Vila Fria, Viana do Castelo					
Closure Year (with 80-year limit) = 2014		Please choose a third unit of measure to represent all of the emission rates below.					
Methane = 59 % by volume		User-specified Unit: av ft <sup>3</sup> /min					
Year	Waste Accepted		Waste-In-Place		Total landfill gas		
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m <sup>3</sup> /year)	(av ft <sup>3</sup> /min)
1998	2 509	2 760	0	0	0	0	0
1999	61 220	67 342	2 509	2 760	2.734E+01	2.093E+04	1.407E+00
2000	104 760	115 236	63 729	70 102	6.932E+02	5.307E+05	3.566E+01
2001	108 883	119 771	168 489	185 338	1.801E+03	1.379E+06	9.265E+01
2002	116 744	128 418	277 372	305 109	2.900E+03	2.220E+06	1.492E+02
2003	121 657	133 823	394 116	433 528	4.031E+03	3.086E+06	2.073E+02
2004	123 797	136 177	515 773	567 350	5.160E+03	3.950E+06	2.654E+02
2005	128 069	140 876	639 570	703 527	6.258E+03	4.791E+06	3.219E+02
2006	132 659	145 925	767 639	844 403	7.348E+03	5.626E+06	3.780E+02
2007	131 804	144 984	900 298	990 328	8.435E+03	6.458E+06	4.339E+02
2008	132 366	145 603	1 032 102	1 135 312	9.460E+03	7.243E+06	4.866E+02
2009	133 080	146 388	1 164 468	1 280 915	1.044E+04	7.994E+06	5.371E+02
2010	133 888	147 277	1 297 548	1 427 303	1.138E+04	8.714E+06	5.855E+02
2011	120 856	132 942	1 431 436	1 574 580	1.229E+04	9.406E+06	6.320E+02
2012	116 644	128 308	1 552 292	1 707 521	1.300E+04	9.956E+06	6.689E+02
2013	116 060	127 666	1 668 936	1 835 830	1.364E+04	1.044E+07	7.017E+02
2014	119 164	131 080	1 784 996	1 963 496	1.424E+04	1.090E+07	7.326E+02
2015	0	0	1 904 160	2 094 576	1.485E+04	1.137E+07	7.636E+02
2016	0	0	1 904 160	2 094 576	1.412E+04	1.081E+07	7.264E+02
2017	0	0	1 904 160	2 094 576	1.343E+04	1.028E+07	6.910E+02

#### 4.3 CARATERIZAÇÃO E ESTIMATIVA DOS RESÍDUOS SEGUNDO O MODELO DO IPCC

Como foi mencionado anteriormente, e como se pode ver na figura 4-12, a caraterização em percentagem dos RU depositados ao longo do ano de 2014 no ASVC é de extrema importância para a posterior avaliação da potencial produção de metano através da obtenção do parâmetro  $L_0$ . Esta avaliação é feita anualmente. Assim a empresa escolhe, aleatoriamente, um camião de RU que seja considerado representativo dos resíduos produzidos na região, de forma a evitar uma má amostragem. Seguidamente, a análise vai incidir sobre quatro parâmetros, sendo eles:

- A fração dos RU que são papéis e têxteis;
- A fração que corresponde aos resíduos de jardim;
- A fração que corresponde a resíduos putrescíveis, e ainda
- A fração correspondente a madeiras.

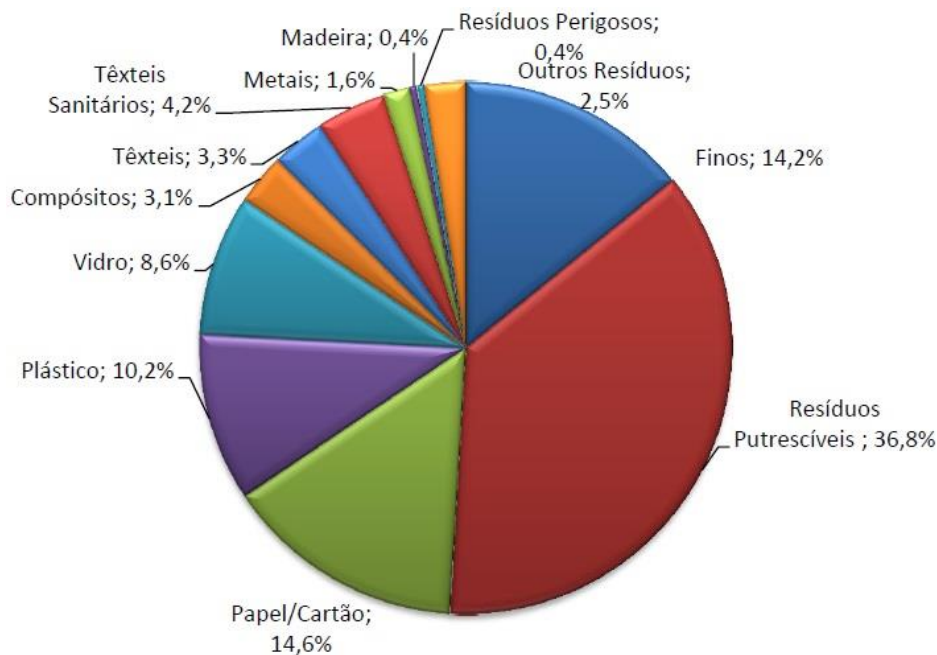


Figura 4-12 - Caracterização dos resíduos produzidos em 2014.

A conjugação destes parâmetros na equação 2 fornece o parâmetro **DOC**, que corresponde ao carbono degradável.

$$\text{DOC} = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,3 \times D)$$

Equação 2 - Cálculo do DOC segundo o IPCC.

Assim após a obtenção do **DOC**, e utilizando ainda outros elementos de cálculo, que são estipulados, como o **MCF** - fator de correção de metano para aterros; **DOCf** - fator de carbono degradável e **F** - fração de metano no gás do aterro, obtém-se a equação 3 modelo do IPCC de forma a obter o  $L_0$ .

$$L_0 = \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOCf} \times F \times (16 / 12)$$

Equação 3 - Cálculo de  $L_0$  segundo o modelo do IPCC.

Apresenta-se na figura 4-13 tabelas aninhadas com os resultados dos cálculos dos parâmetros em causa.

2

As caracterizações que serviram de base ao cálculo de L0 foram as últimas de cada sistema (até 2004 inclusive)

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

L0 = MCF x DOC x DOCf x F x (16 / 12)

DOC = (0,4 x A) + (0,17 x B) + (0,15 x C) + (0,3 x D)

A - Fração de R.S.U. que são papeis e textéis

B - Fração de R.S.U. que são resíduos de jardim

C - Fração de R.S.U. que são resíduos putrescíveis

D - Fração de R.S.U. que são madeiras

A29,00%

B4,30%

C28,00%

D0,80%

Somatório62,10%

DOC0,17ton/ton

MCF1,00

DOCf0,60

F0,50

L00,07ton CH4 / ton R.S.U.

L0 (PTN)93,9m3 / ton

L0 (nPTN)100,7

Quadro Resumo

Fração de resíduos admitidos ao cálculo

L0 (m3 / ton)

Resulima62,1%93,9

Assumiram-se os seguintes valores para as incognitas do modelo

MCF1

DOCf0,6

F0,5

Notas

MCFFactor de correcção de metano para aterros

DOCfFração de carbono degradável

FFração de metano no gás de aterro

Fonte: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme

Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories

Figura 4-13 - Resumos dos dados obtidos a partir do modelo do IPCC.

Assim sendo, observa-se que as frações analisadas são de 29%, 4,30%, 28% e 0,8%, obtendo-se assim um **DOC** de 0,17. Como os restantes parâmetros são pré-determinados, obtém-se assim um **L<sub>0</sub>** de 100,7 m<sup>3</sup>/ton. Este valor manteve-se constante durante todas as avaliações anuais realizadas pela empresa pelo que nunca se alterou o valor no *LandGEM*, sendo apenas arredondado para 100 m<sup>3</sup>/ton.

#### 4.4 RESULTADOS GLOBAIS DA QUALIDADE DO BIOGÁS

Na figura 4-14, podemos visualizar a evolução dos parâmetros do biogás na entrada do CEP, com os valores globais da qualidade do biogás fornecidos pelo aterro, entre o dia 3 de Março e o dia 16 de Junho de 2015. A concentração de metano foi sempre superior aos 52%, sendo que a partir de meados de Abril de 2015, o CH<sub>4</sub> mantém-se constante e acima dos 55/56%, resultado ótimo para se conseguir uma produção de eletricidade constante e máxima.

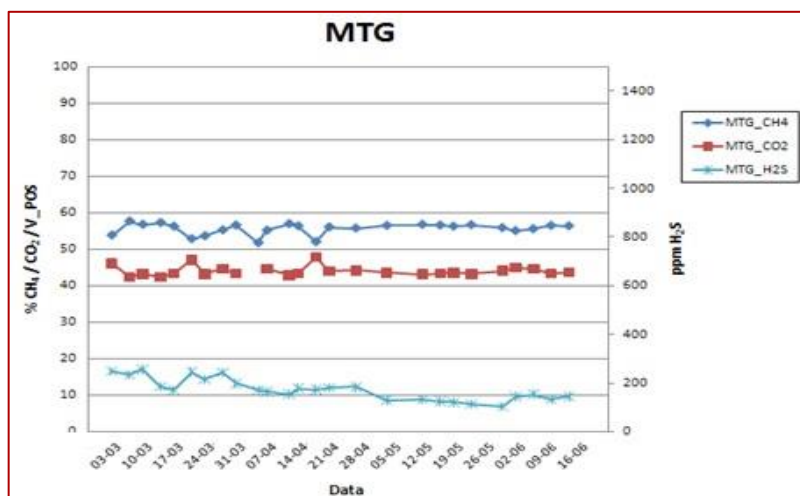


Figura 4-14 - Evolução durante o segundo trimestre de 2015 do  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  na entrada do CEP.

A figura 4-15 permite observar que, na sua generalidade, à entrada do CEP, o biogás produzido pelo ASVC não possui oxigénio e azoto, pois as concentrações destes gases foram quase nulas durante o segundo trimestre de 2015.

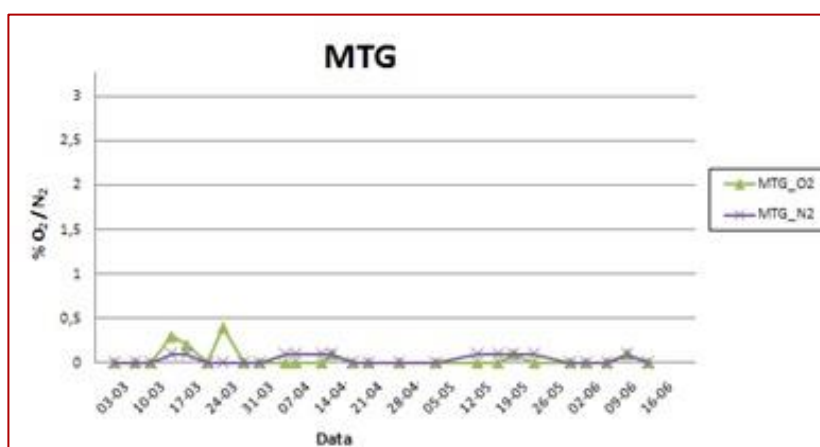


Figura 4-15 - Evolução durante o segundo trimestre de 2015 do  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  na entrada do CEP.

Os elevados valores de biogás produzido no aterro, sugerem um aterro sanitário bem explorado, resultado de uma impermeabilização eficaz, boa drenagem dos lixiviados e do biogás produzido, mantendo um bom equilíbrio da humidade no interior da massa de resíduos. O número e a distribuição dos poços do biogás sugere que poderão ser insuficientes, redundando numa perda significativa de biogás para a atmosfera. Com



efeito, a área de influência de cada poço de biogás, é bem drenado e é adequada para os poços que alimentam o CEP. Desde o início de 2015, o caudal de biogás que alimenta os motores foi sempre o suficiente para garantir o funcionamento destes a 100%, com valores de caudal de biogás ligeiramente superior a 1100 Nm<sup>3</sup>/h.

#### 4.5 ANALISE DOS DADOS DE QUALIDADE DE BIOGÁS EM CADA POÇO

Os dados obtidos sobre a composição do biogás nos diferentes poços e nas diferentes medições podem ser observadas no anexo 3. Assim, no ASVC e tendo em consideração a sua composição classifico-o como excelente, quando a composição de metano é superior a 58%; em muito bom quando a concentração do metano se encontra entre os 56 e os 58% e não há concentrações elevadas de oxigénio e azoto; em bom quando a concentração de metano se situa entre os 54% e os 56% e para composições de metano entre os 50% e 54% o poço já é considerado suficiente. Deve realçar-se que a composição do metano não é o único fator a ser considerado quando se avalia a qualidade total do biogás, assim deve-se ter sempre em consideração a concentração de sulfureto de hidrogénio, sendo que valores elevados deste parâmetro obrigam a uma abertura, mesmo que mínima, das condutas. Esta abertura vai depender também de parâmetros como o oxigénio e o azoto, pois quando estas composições assumem valores elevados os poços devem ser encerrados ou abertos o mínimo possível.

De uma forma geral encontrámos poços com boa e muita boa qualidade no aterro da RESULIMA, sendo eles o P.C.2, P.2, P.C.3, P.3, P.C4, P.4, P.5, P.6, P.7, P.9, P11, P.12, P.13, P.14, P.21 e P.23. A restante maioria foram considerados como poços de média qualidade sendo eles o P.15, P.16, P.22, P20, P.24, P.25, P.26 e o P.27.

O facto de a sua qualidade ser boa não significa, no entanto, que a maioria destes poços se encontre aberto a 100%. Daí conclui-se, que apesar destes poços se encontrarem em boas condições de qualidade de biogás, só acontece porque os ângulos de abertura das válvulas de ramais não estarem totalmente abertos. Em suma caso se impusesse a estes poços uma maior abertura, a sua qualidade iria diminuir, devido a uma possível entrada de ar no aterro pelo aumento da depressão.

#### 4.6 RESULTADOS DA CAMPANHA DE PRESSÃO DO BIOGÁS DE MEDIÇÃO

Ao realizar uma caracterização de cada poço de biogás ao nível da sua depressão, e havendo possibilidade, mediu-se a depressão de biogás em todos os poços em função da posição da válvula de ramal efetuando as respetivas medições da depressão para posições da válvula de ramal de 0% até 100%, em intervalos de 25%. Esta campanha de medição da depressão realizou-se no dia 8 de Junho de 2015, simultaneamente à monitorização da qualidade do biogás. Os resultados obtidos constam na tabela 4-4.

*Tabela 4-4 - Resultados da campanha de medição da depressão de biogás nos poços do ASVC.*

Abertura válvula de Ramal (%)	DEPRESSÃO NOS POÇOS em mb																															
	P1	PC2	P2	PC3	P3	PC4	P5	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	MTG	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	F E C H A R O	0	0	0	0	-48	
25																																-48
50	-0,6	0									0							-1				-0,5			-1							-48
75	-1,2	-1	-0,5	-1,5	-1		-0,5			-1			0		-1,5	-1		-3,5			-1	-2	-2		-2							-48
100	-1,5	-1,5	-1,2	-2	-1,5	-2	-1,5	-1,5	-1	-1,5		-1	-1,2	-1,8			-1,5	-8	-2			-7,5	-7,5		-6							-48

Na tabela 4-5 mostro os valores de abertura das válvulas de ramais e respetivas depressões em que ficaram todos os poços do ASVC depois da campanha de medição.

*Tabela 4-5 - Resumo dos resultados referente posições das válvulas de ramais e das respetivas depressões depois da campanha de medição do 08/06/2015.*

	POÇOS																														
	P1	PC2	P2	PC3	P3	PC4	P5	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	MTG
Abertura válvula de Ramal (%)	20	50	75	100	75	100	75	100	100	100	50	100	75	100	75	75	100	75	100	10	75	100	50	75	//	75	75	75	75	//	
DEPRESSÃO (mb)	0	0	-0,5	-2	-1	-2	-0,5	-1,5	-1	-1,5	0	-1	0	-1,8	-1,5	-1	-1,5	-3,5	-2	0	-1	-7,5	-1	-2	//	-1	-1,5	-1,5	-1	-48	

#### 4.7 ANÁLISE DOS DADOS DE DEPRESSÃO

Apesar da depressão de biogás ser elevada na entrada dos motores, esta é muito reduzida ao nível dos poços. Isto deve-se pelo facto do aterro ser muito extenso (aprox. 10 ha) e pela cobertura diária de terra (impermeabilização parcial do aterro) que influencia positivamente a pressão.

#### 4.8 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DA TEMPERATURA DO BIOGÁS

Na tabela 4-6 encontram-se os resultados da campanha de medição da temperatura do biogás do ASVC realizado no dia 11 de Junho 2015.

*Tabela 4-6 - Resultados da campanha de medição da temperatura do biogás no ASVC realizado no dia 11/06/2015.*

	TEMPERATURA EM °C																														
N° Poços	P1	PC2	P2	PC3	P3	PC4	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	MTG
Temperatura do biogás	39,8	45	41,5	30,3	29,1	31	36,5	43,5	31	29,7	31,7	33,5	26,5	34,5	31,5	31,5	30,9	35,3	34,5	31,5	36,5	34,5	34,5	30,8	37,5	T E C N I C A	38,3	37	39,2	39,9	29,8
Temperatura do ambiente			35,3			26,5	28,5	26														29,2	29,2	22,6				28,5			

#### 4.9 ANÁLISE DOS DADOS DE TEMPERATURA

Relativamente aos dados obtidos da análise da temperatura pode-se afirmar que estes se enquadram dentro dos parâmetros normais e esperados, como já foi referido anteriormente, encontram-se entre os 30 e os 40 °C. Foi observado em duas condutas temperaturas superior a 40 °C, especificamente o P.C.2 e o P5, como se pode ver na tabela 4-5, localizadas perto uma da outra. Este aumento da temperatura poderá assim dever-se à exposição ambiente, em particular ao sol incidir diretamente sobre as condutas na altura em que foi realizada a medição.

#### 4.10 PRODUÇÃO DE ENERGIA VS CUSTOS DE MANUTENÇÃO

Através figura 4-16, no ano de 2014 o CEP injetou na rede do Serviço Elétrico Público cerca de 15,11 GWh de eletricidade, a partir de 5 772 810 m<sup>3</sup> de biogás com um teor médio de metano da ordem dos 58,6%. Na verdade, em 2014 assistiu-se ao restabelecimento da produção anual normal do CEP. A menor produção de 2013 deveu-se a uma avaria de grande dimensão que originou várias horas de indisponibilidade no motogerador n.º 1, afetando a produção nos meses de outubro e novembro de 2013. Desde o arranque do CEP em Agosto de 2010 até à presente data, o ASVC, injetou no SEP mais de 80 GWh. É reconhecido que todo o processo relacionado com a recolha e deposição de RU, exploração e valorização energética, advém de uma estrutura bastante complexa exigindo uma sistematização nos procedimentos, instruções de trabalho, planos de manutenção preventivos adequados.





Figura 4-16 - Energia vendida ao serviço elétrico público (SEP).  
Fonte: (RESULIMA, 2015).

Relativamente à disponibilidade dos motogeradores ao longo do ano de 2014, verifica-se pela figura 4-17 a consistência do MTG nº1 ao longo do ano, enquanto o MTG nº2, devido a uma avaria relevante, não teve idêntico desempenho.

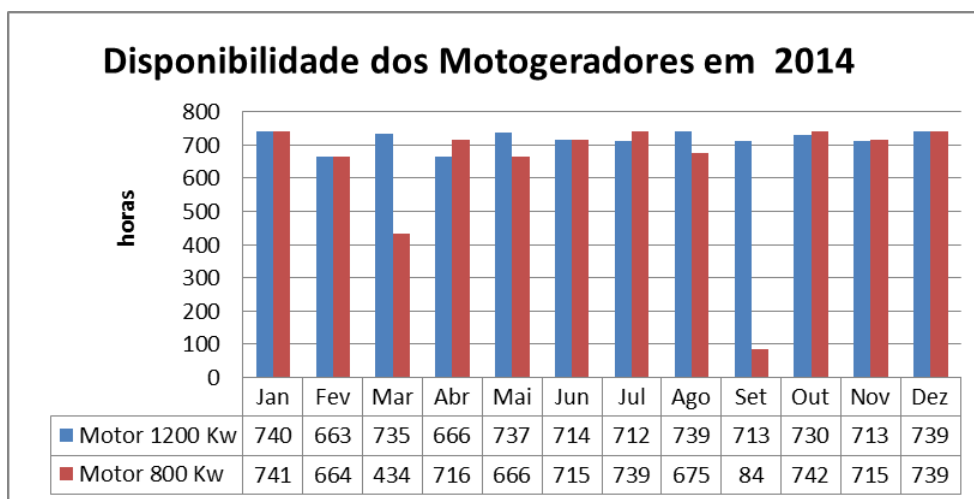


Figura 4-17- Disponibilidade dos motogeradores em 2014.  
Fonte: (RESULIMA, 2015).

Através da figura 4-18, é possível aferir a relação entre a faturação e os custos totais de manutenção, seja ela preventiva ou curativa. Desde o arranque do CEP, essa relação cifra-se em média, aproximadamente de 10%.



*Figura 4-18 - Faturação vs custos de manutenção.*  
 Fonte: (RESULIMA, 2015).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários é uma opção económica e rentável como mostram diversos estudos, designadamente o efetuado no âmbito da presente dissertação. Também é benéfico do ponto de vista ambiental porque há uma diminuição da emissão de  $\text{CH}_4$  para a atmosfera e diminui-se ainda a dependência de energias de origem fóssil. Este aproveitamento exige um bom planeamento, uma boa operação, monitorização e manutenção, pois este é um sistema complexo que se encontra em constante mutação.

No decorrer do presente trabalho foi possível perceber o funcionamento de um aterro sanitário e em particular os principais aspetos ligados a produção do biogás, bem como dos diversos fatores que interferem e/ou influenciam a exploração económica.

A experiência do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário da RESULIMA é paradigmática, pois está desde há cerca de 5 anos a constituir um ativo financeiro importante, depois de cerca de 10 anos sem aproveitamento dessa fonte energética. Mostram os dados que o aterro está a produzir biogás em crescendo e constitui um exemplo que deve ser seguido na exploração rentável de aterros sanitários de resíduos urbanos.

O CEP possibilita, por si só, uma grande variedade de soluções técnicas, particularmente no aproveitamento térmico, que poderão ser desenvolvidas em estudos futuros como por exemplo:

- Aproveitamento térmico dos gases de escape depois do turbo, do líquido de refrigeração do motor e da mistura ar/biogás pressurizado depois do turbo e do líquido de lubrificação para aquecer as águas quentes sanitárias (AQS) nos edifícios de apoio e administrativos;
- Implementação de uma pequena turbina a biogás ou de uma turbina a vapor que aproveitaria o calor dos gases de escape para produzir os 3% de autoconsumo elétricos dos motores e assim vender a totalidade da energia produzida à rede elétrica nacional (REN);

- Avaliação do investimento na instalação de mais poços de desgaseificação, tendo em conta que o número de poços instalados é de 31, quando a área do aterro recomendaria cerca de 50 para uma melhor remoção do biogás e assim diminuir drasticamente a emissão fugidia para a atmosfera e permitir a Instalação do terceiro motogerador, provavelmente de 400kW, evitando a queima atual de 100 a 170 m<sup>3</sup>/h de biogás no queimador para a atmosfera. Por outro lado, potenciando o aproveitamento quando se procede a intervenções de manutenção dos motogeradores;
- Avaliar detalhadamente toda a temática associada aos custos provocados pelo desgaste, corrosão e manutenção dos motogeradores em consequência de se realizar ou não pré-tratamento do biogás;
- Averiguar se a unidade de secagem do biogás recentemente instalada, cumpre o fim para a qual foi concebida e efetivamente minimiza os fenómenos de desgaste e corrosão dos MTG.

A título de trabalhos futuros relacionados com a temperatura sugere-se que deveria ser realizada uma medição durante o inverno, de forma a avaliar possíveis alterações com a descida da temperatura ambiente. Outro trabalho que deveria ser realizado, seria uma medição da temperatura no interior do próprio aterro, verificando-se assim a temperatura real do mesmo, uma vez que todas as medições foram realizadas em condutas, o que poderá, ainda que minimamente, ter afetado a medição da temperatura efetiva do interior do aterro.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Cabeças. (2005). Aterro Sanitário . Resíduos Sólidos Urbanos. Enquadramento, Conceitos Gerais e Bases de Projeto, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Deublein e Steinhauser. (2008). Biogas from waste and renewable resources. wiley-VCH-Verlag GmbH & KGaA, pág. 323-398.
- Diário da República. (2006). I Série-A nº 171. Decreto-Lei nº 178/2006 de 5 de Setembro.
- Diário da República. (2009). I serie- A nº 153. Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto.
- Dubois e Mercier. (2009). Energy Recovery. New Science Publishers Inc, New York, USA. pág. 6-60.
- INE. (2013). Estimativas de população média residente em 2013.
- Manfredi. (2009). Environment Assessment of Solid Waste Landfilling in a Life Cycle Prespective (LCA model EASEWASTE). Technical University of Denmark, Phd Thesis.
- Montilha. (2005). Biogás, Energia Renovável. Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, Brasil, pág. 31-34 e 52.
- PERSU2020. (2015). Plano de Ação 2020 da RESULIMA, S.A. Viana do Castelo.
- RESULIMA. (2014). Registos / Indicadores da capitação.
- RESULIMA. (2015). CICLO LIXO URBANO. Viana do Castelo.
- RESULIMA. (2015). Indicadores da energia vendida ao SEP e faturação vs custos de manutenção. Vila Fria, Viana do Castelo.
- Rovers & Associados. (2010). Landfill Gas Management Facilities Deesign Guide

Lines. Richmond British Columbia.

Russo. (2005). Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho. pág. 43-58.

Seara de Brito. (2006). Taxa de emissão de Biogás e parâmetros de Resíduos Sólidos Urbanos. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Brasil. pág. 63-102.

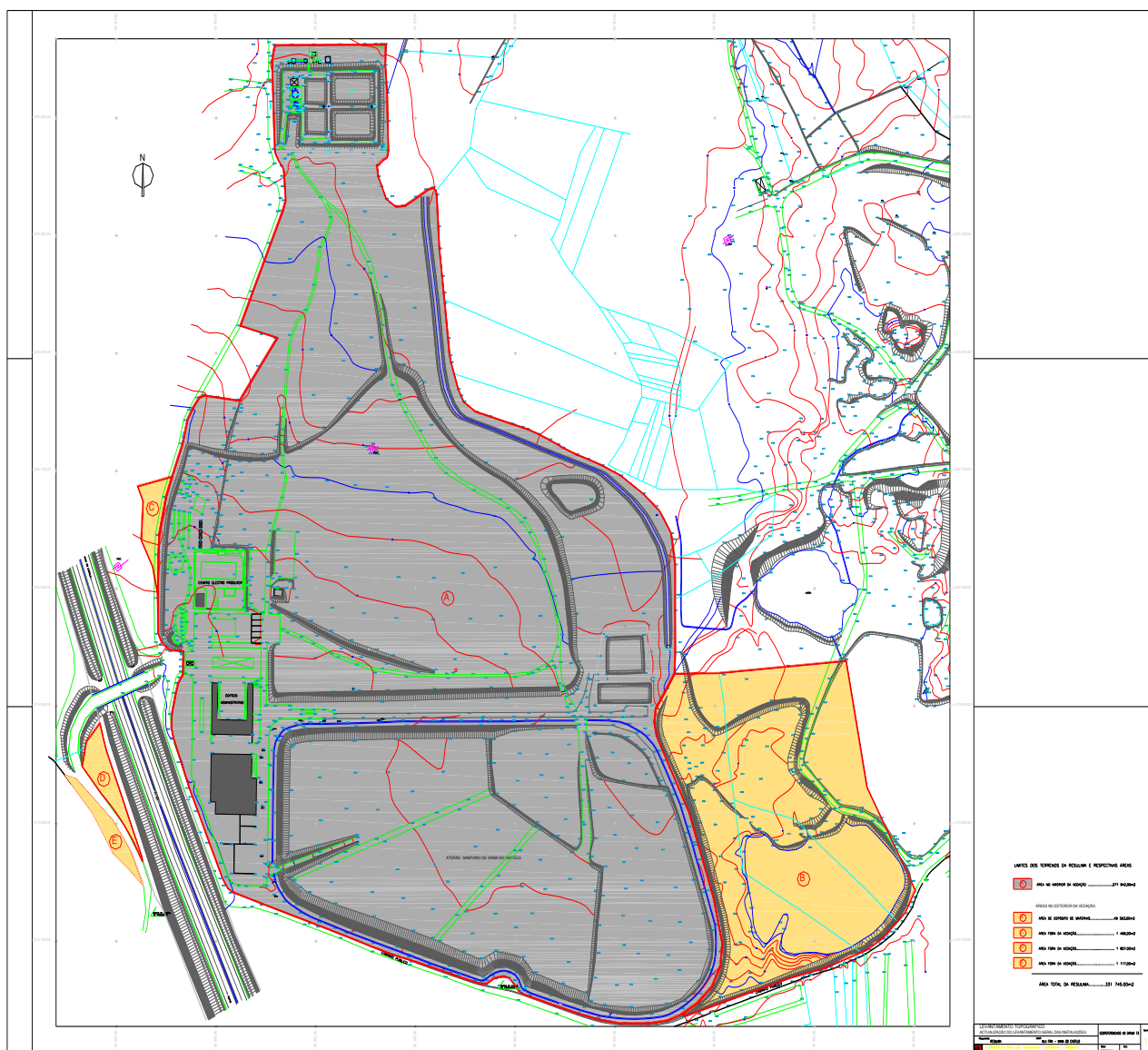
Statplanet. (2010). Software personalizado para a Resulima.

Tchobanoglous. (1993). Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues. NY, McGraw-Hill, INC.

## 7 ANEXOS

### Anexo 1

#### Vista global em planta do ASVC



## Anexo 2

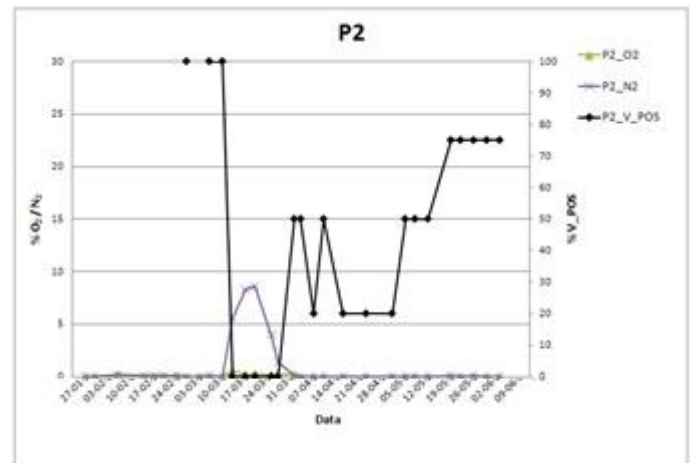
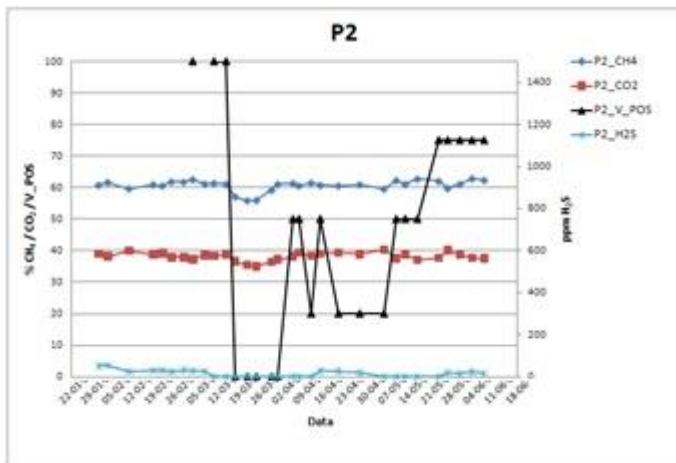
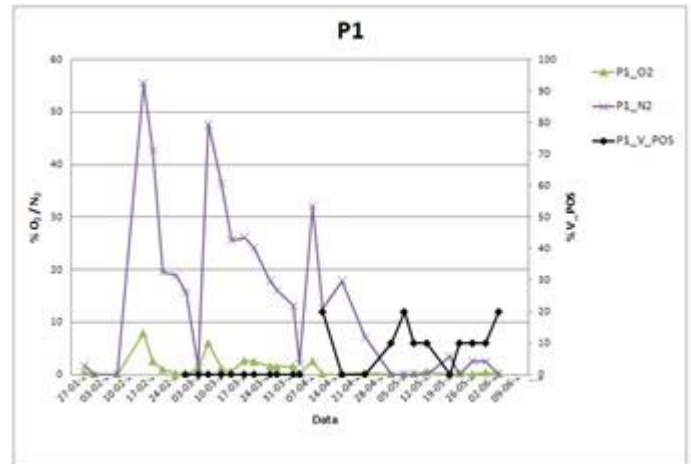
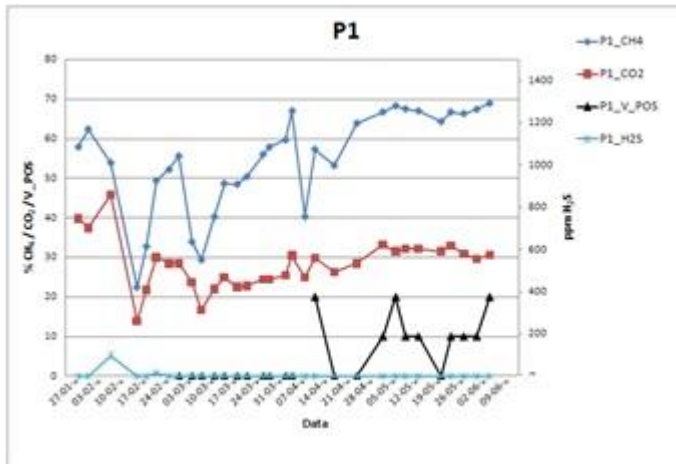
### Planta da célula de deposição do ASVC

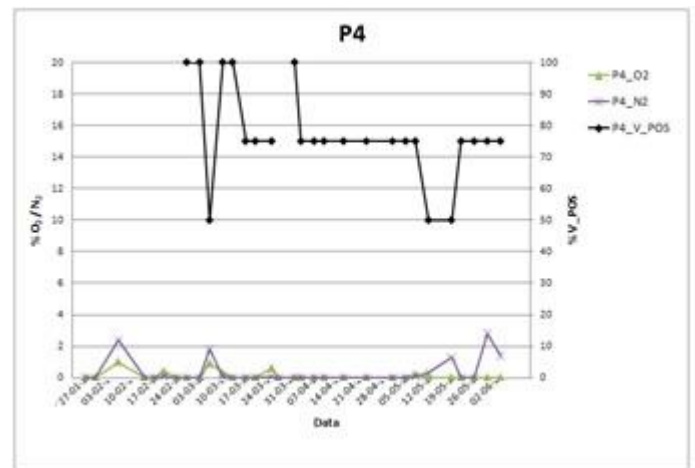
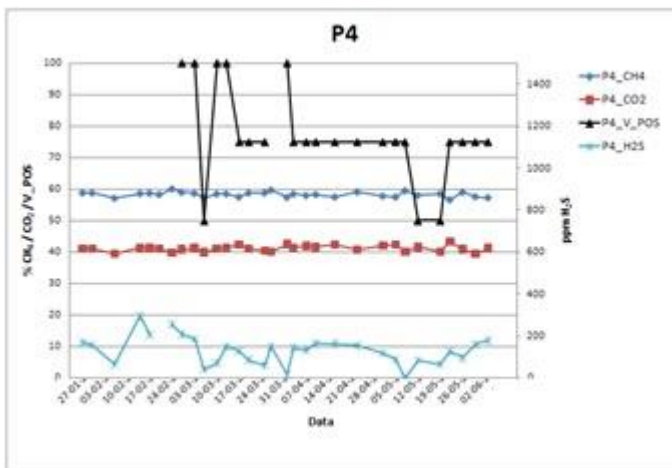
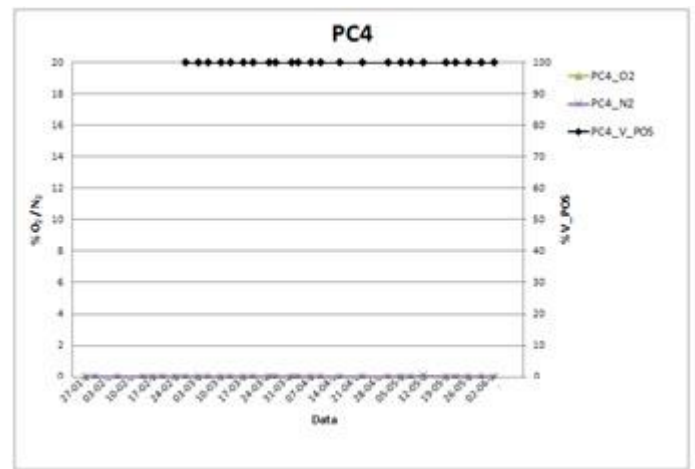
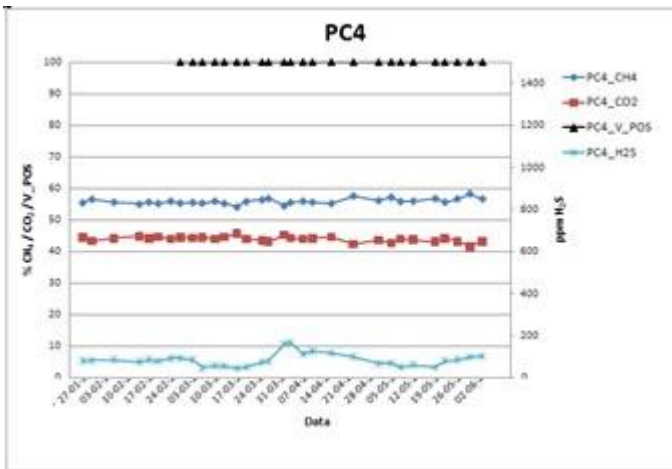
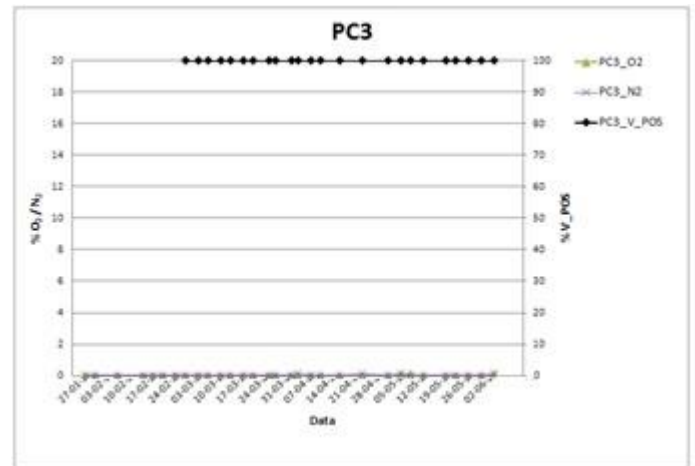
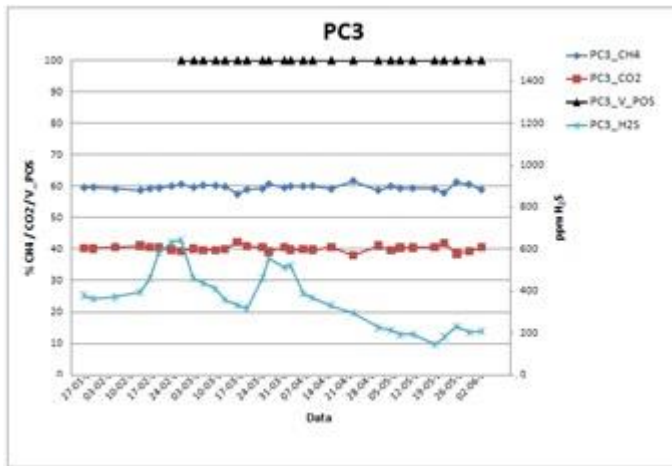


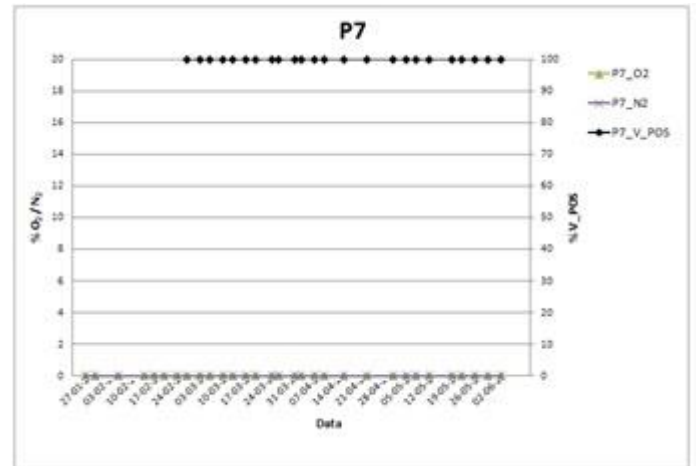
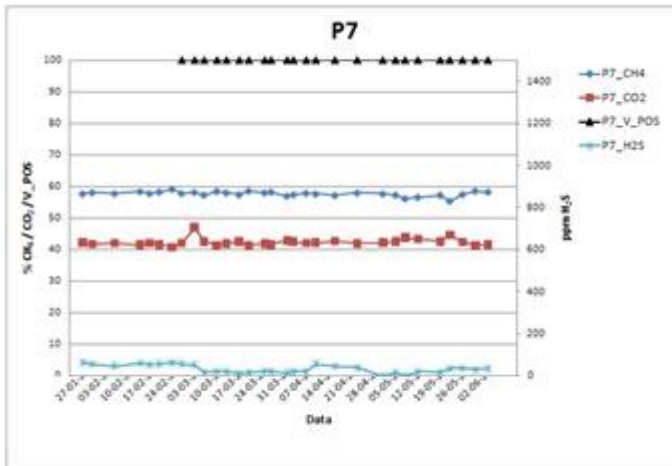
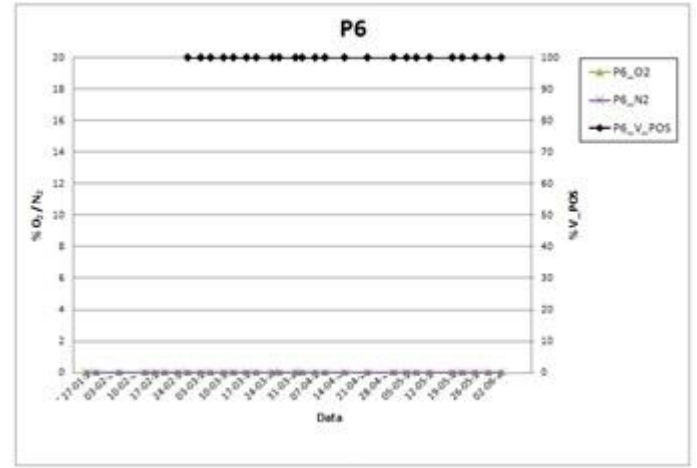
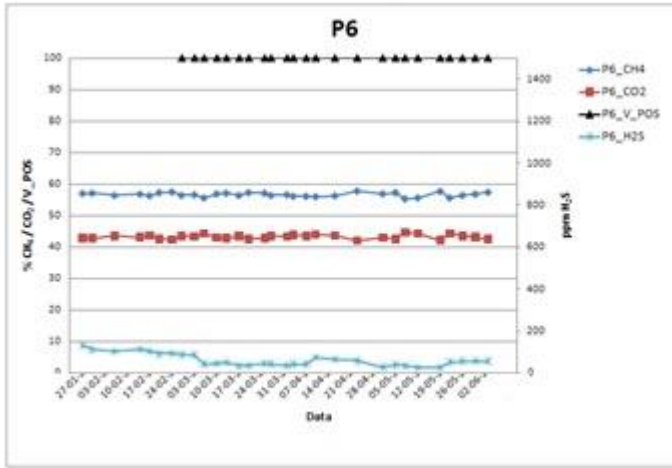
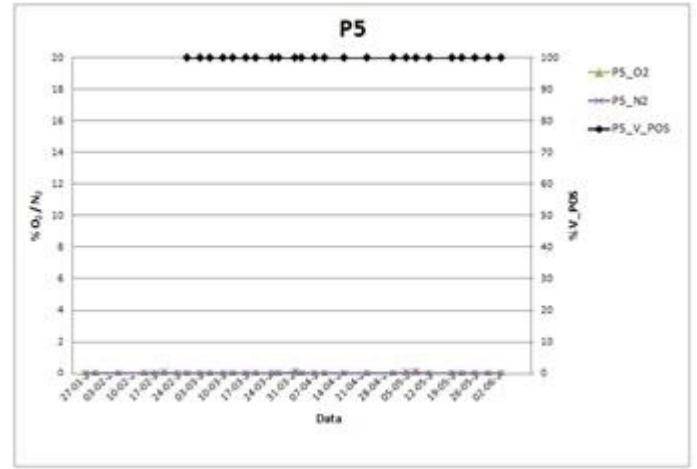
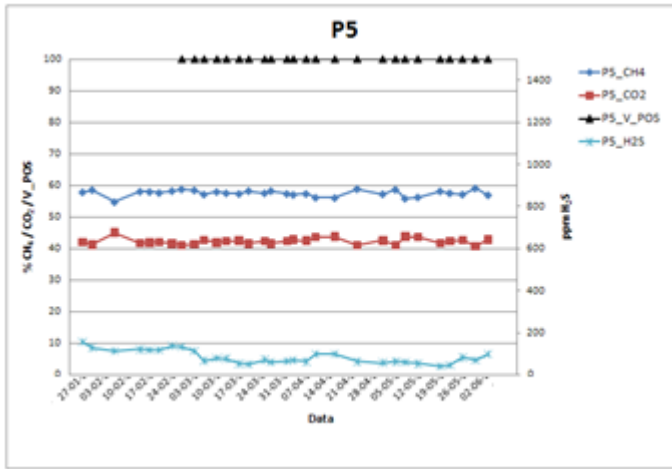


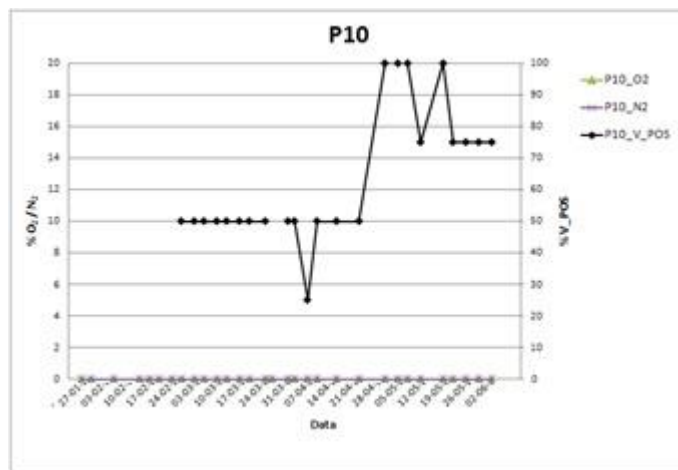
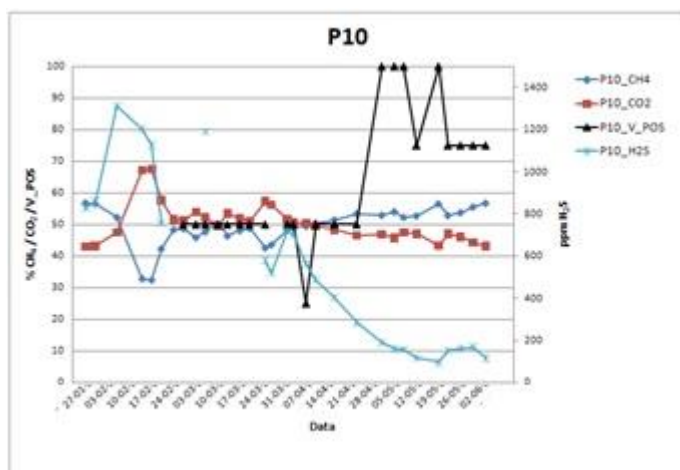
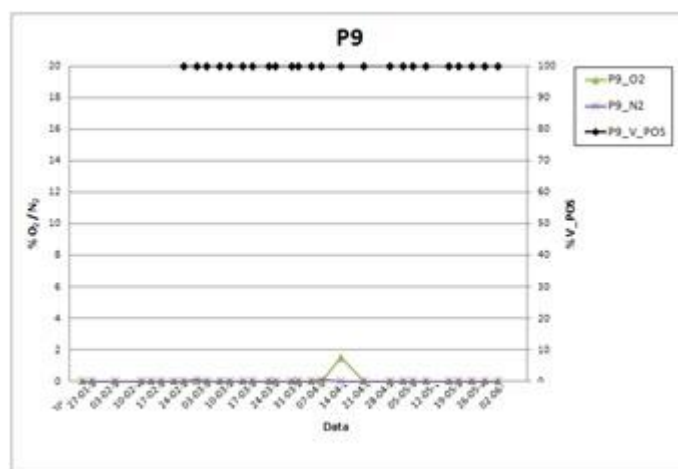
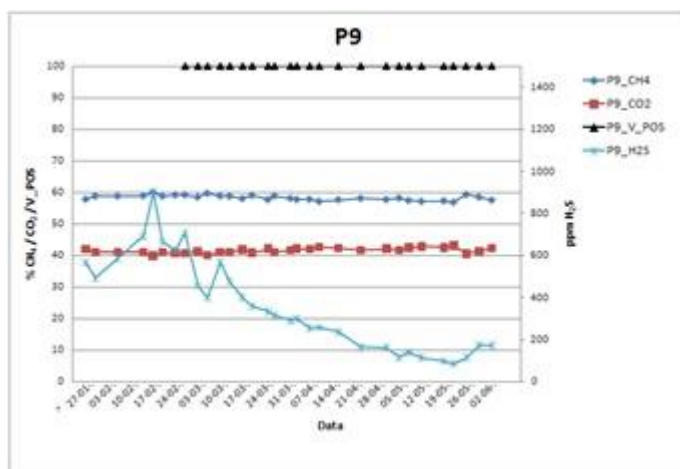
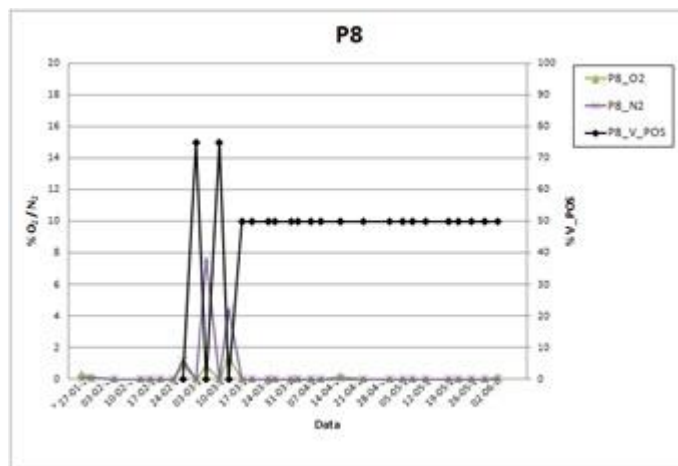
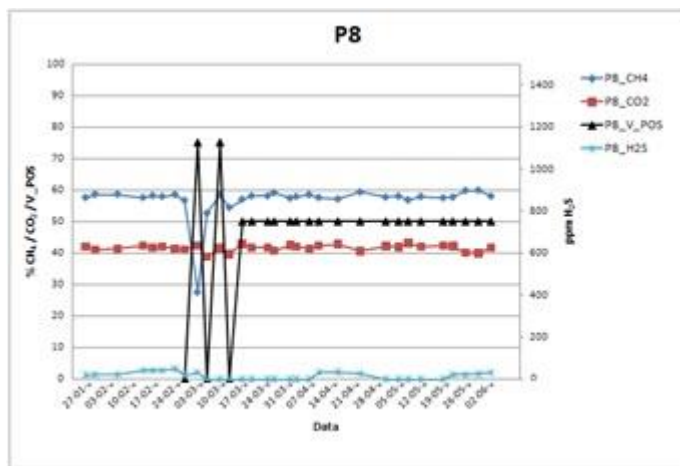
## Anexo 3

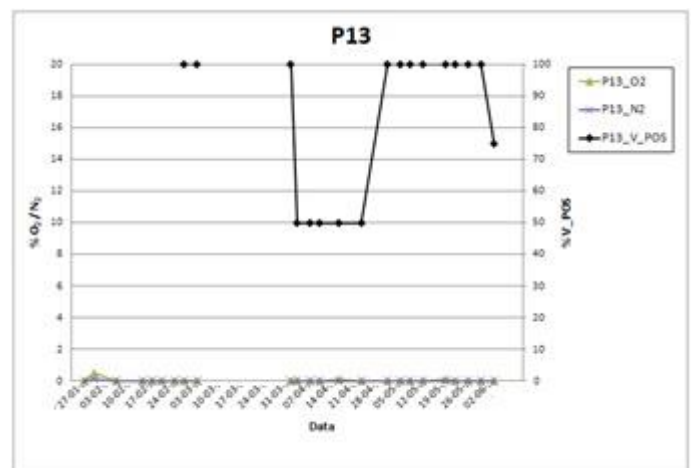
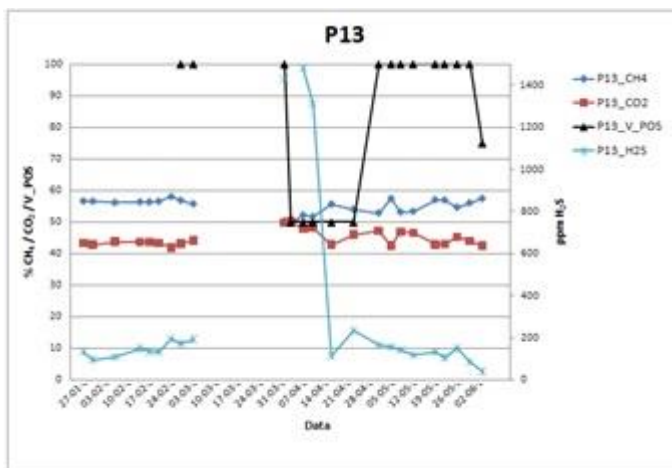
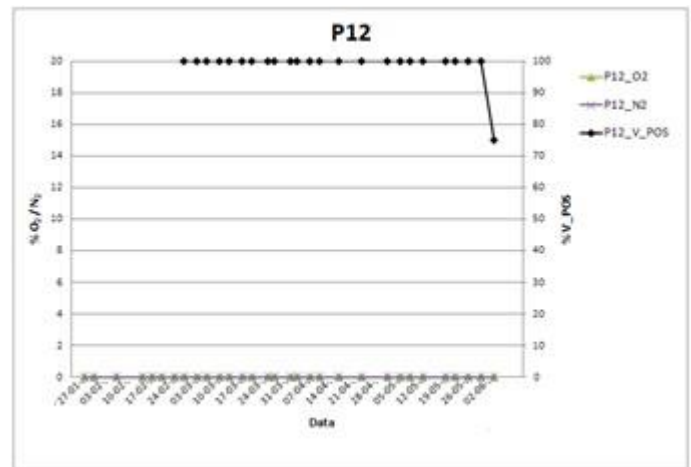
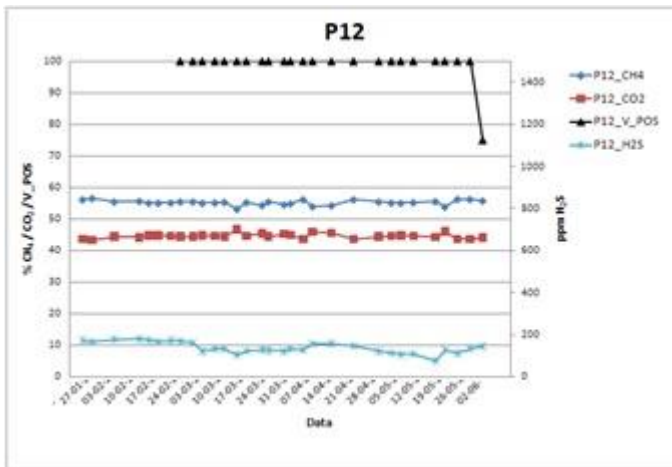
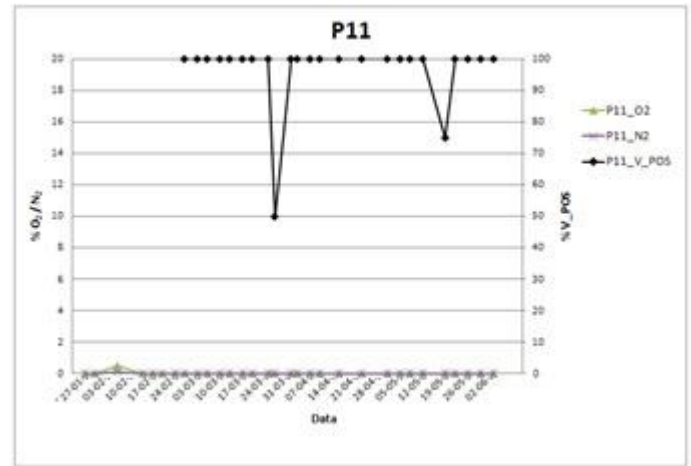
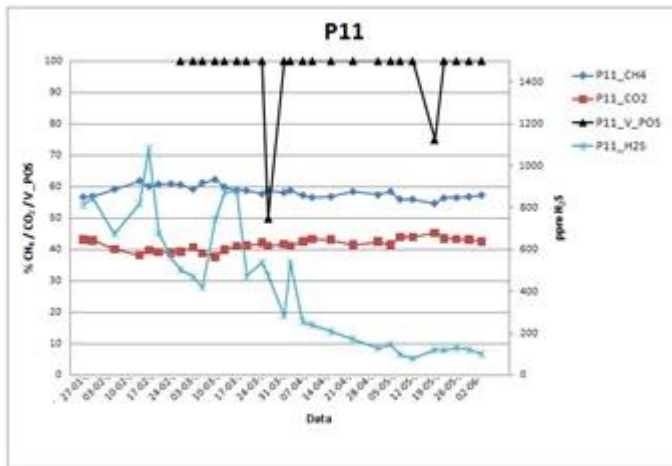
### Concentrações do biogás em 31 poços entre 27/01/15 e 07/06/15

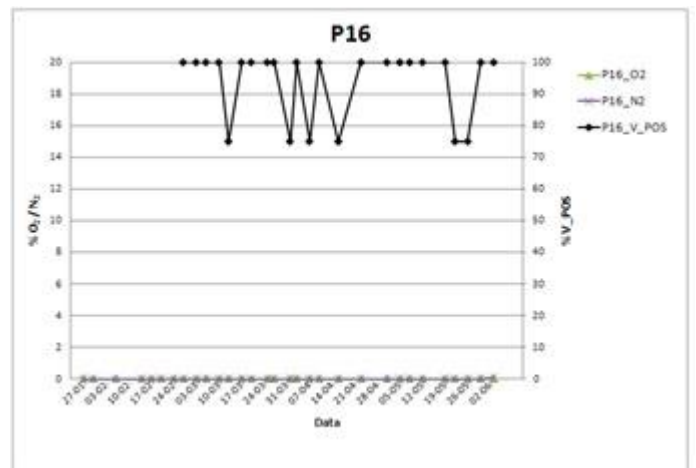
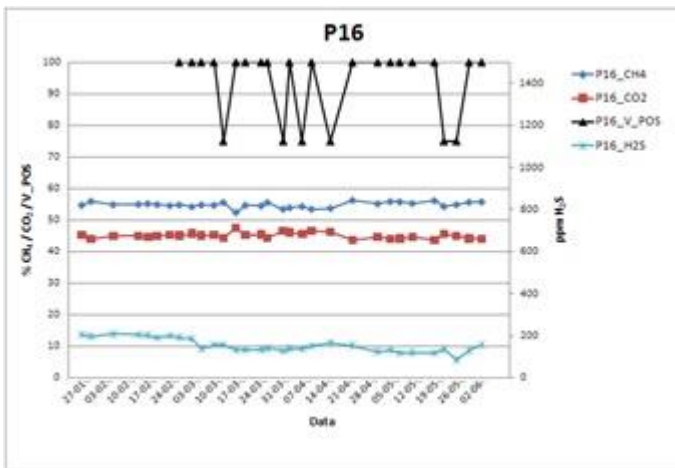
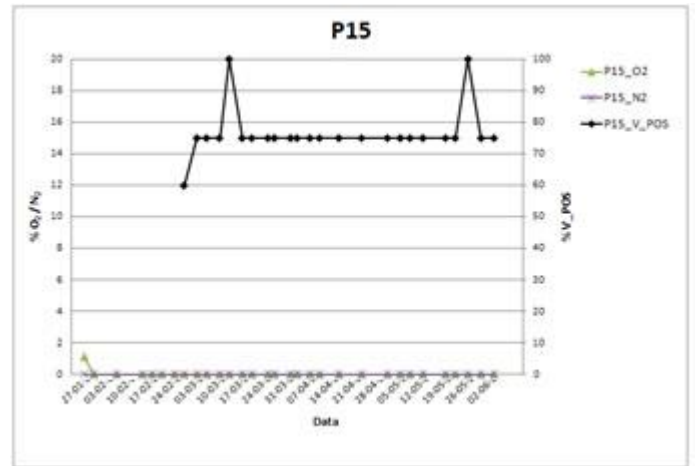
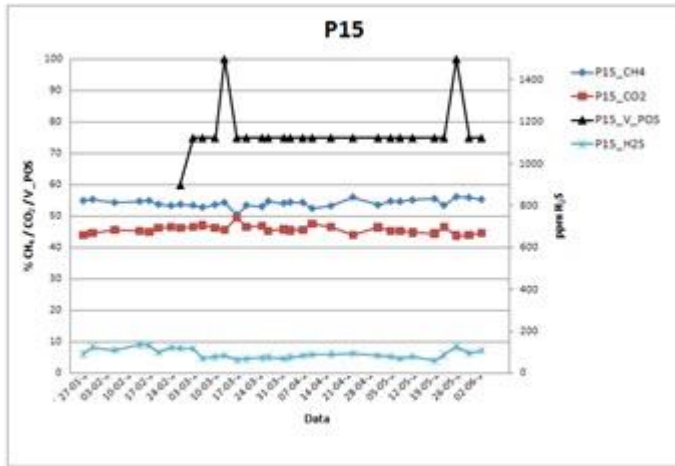
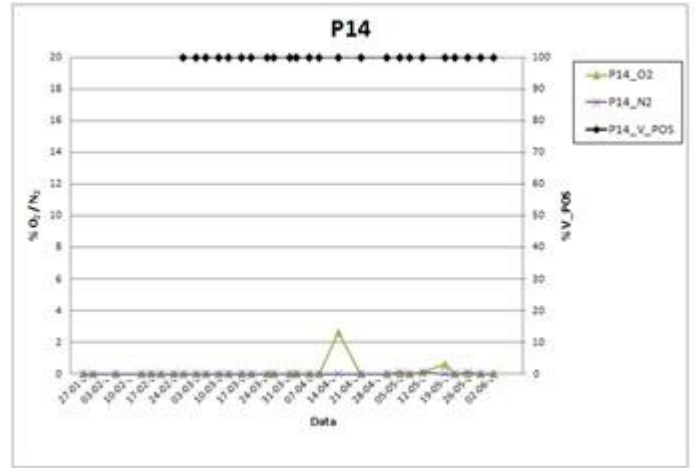
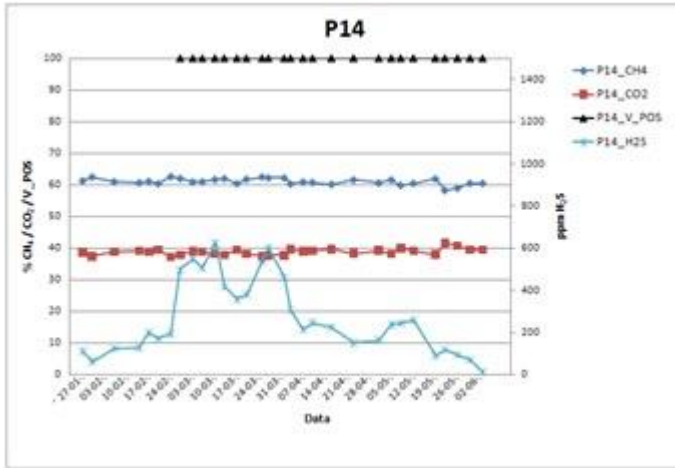




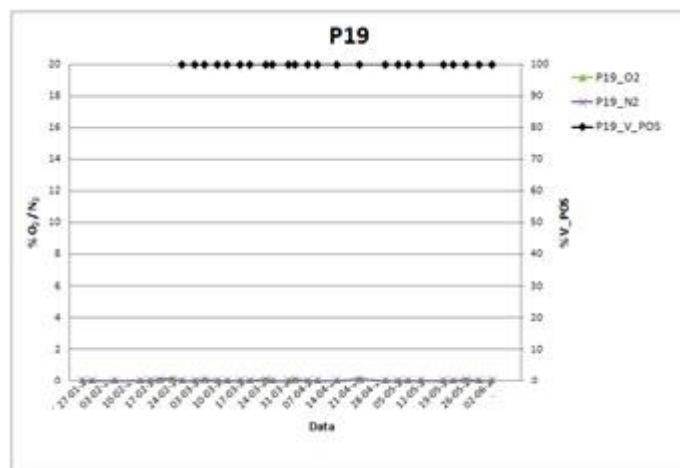
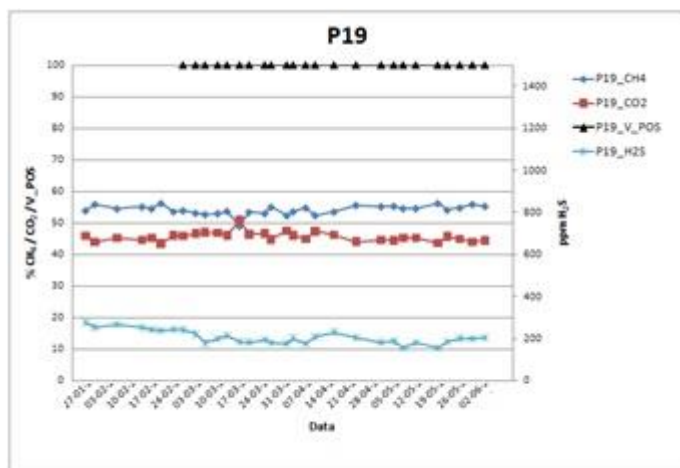
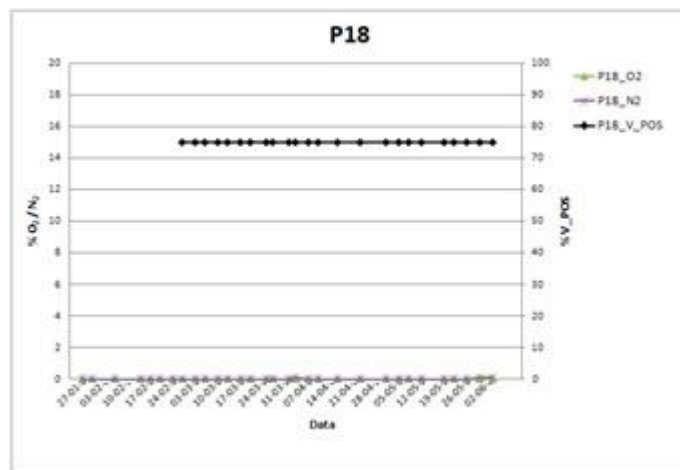
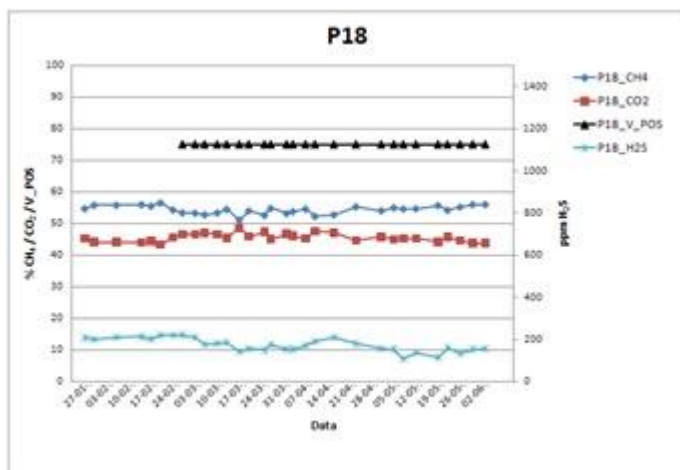
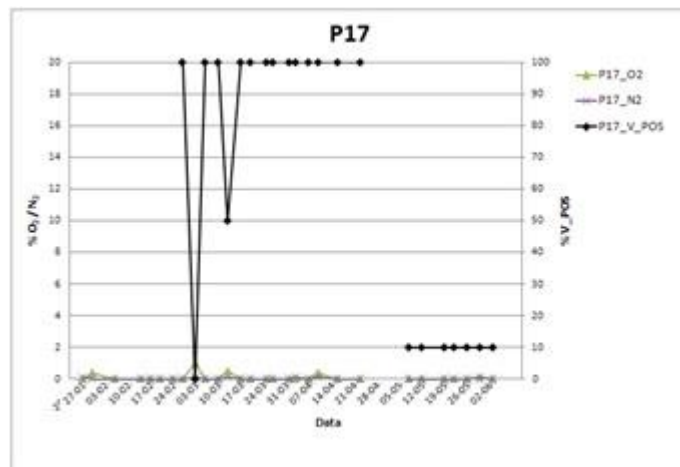
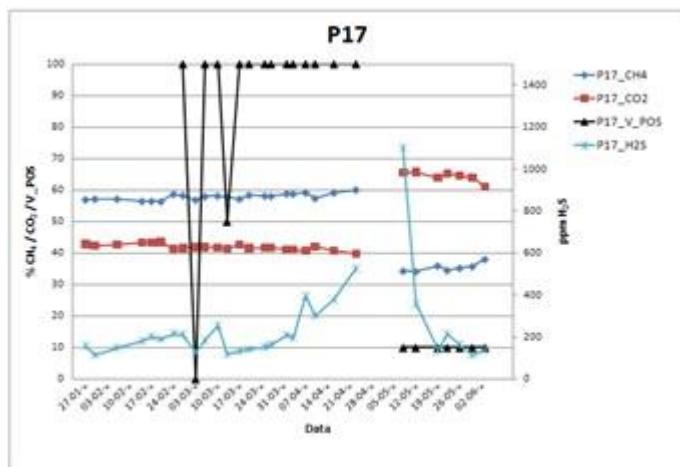


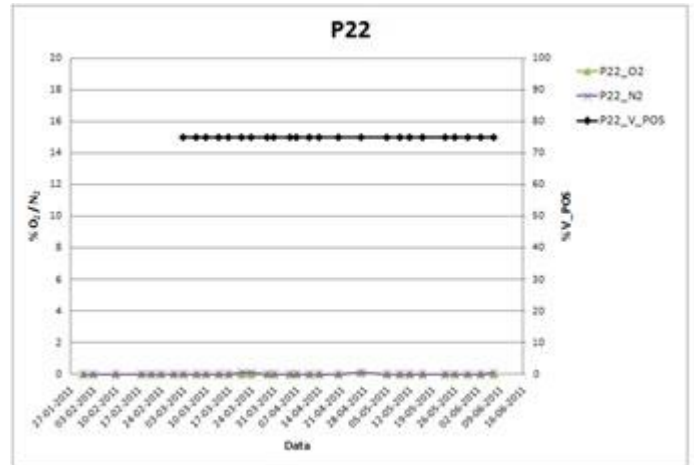
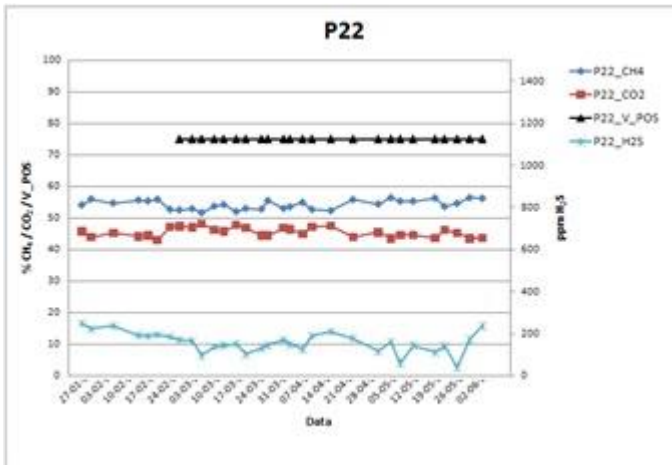
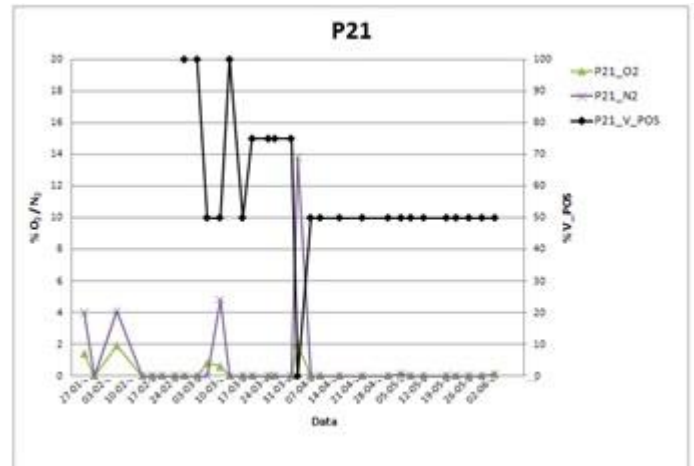
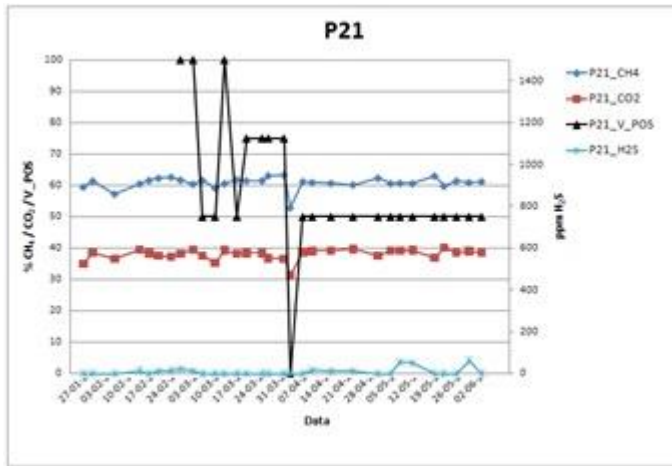
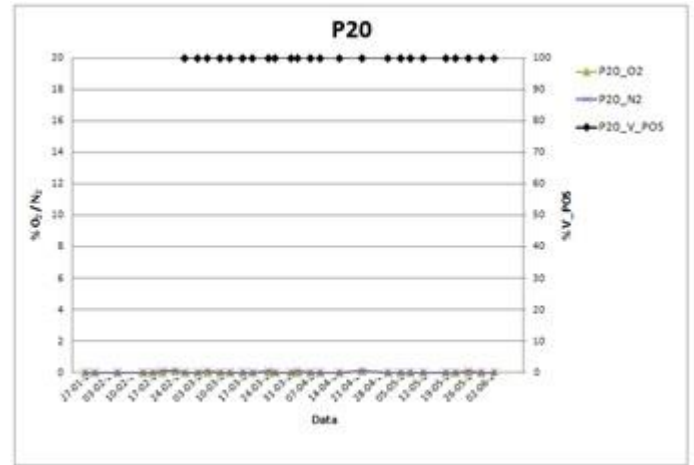
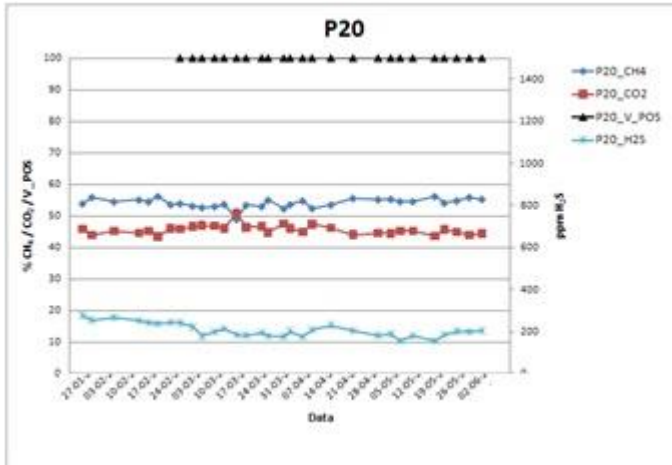




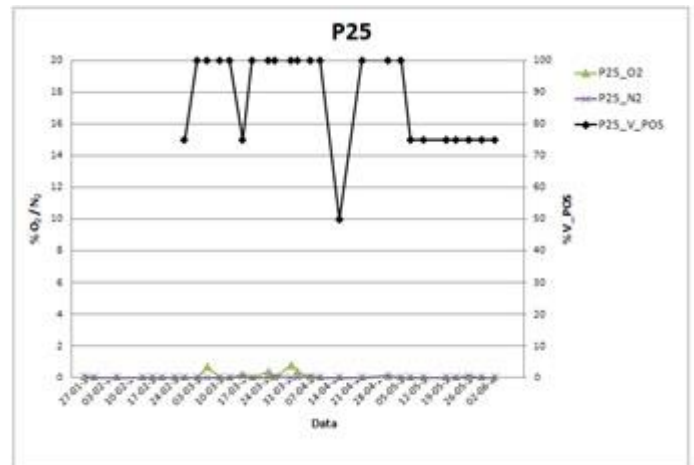
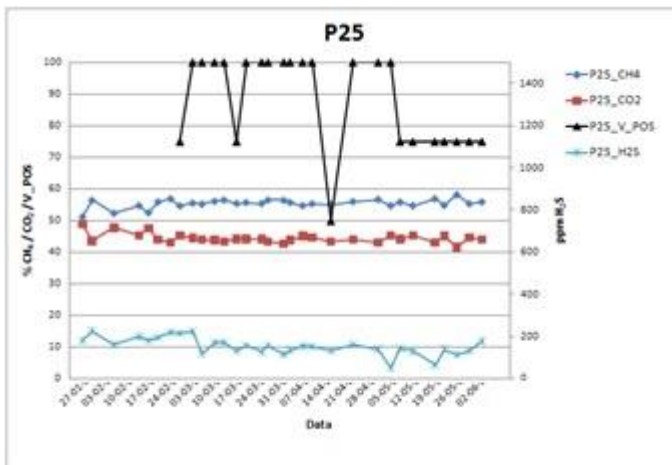
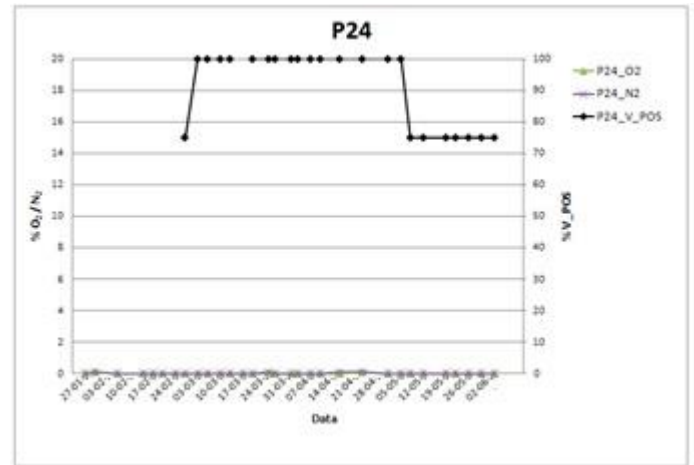
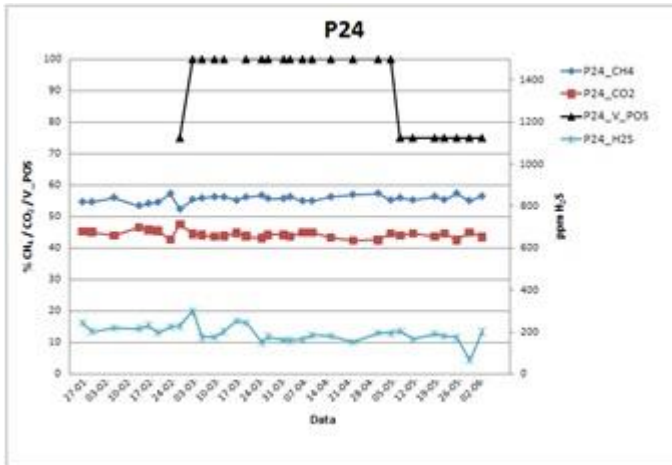
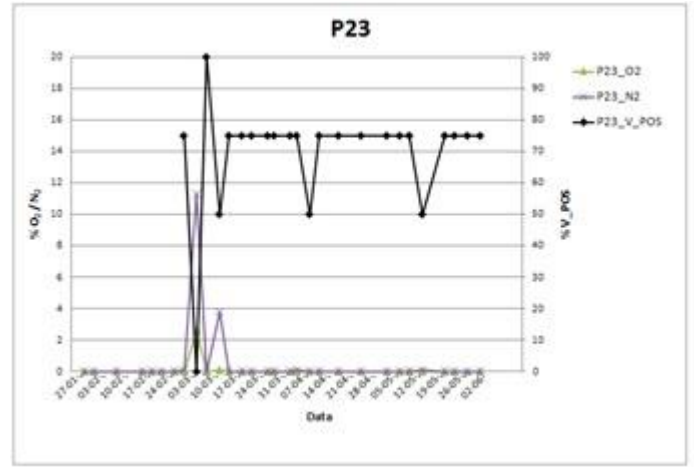
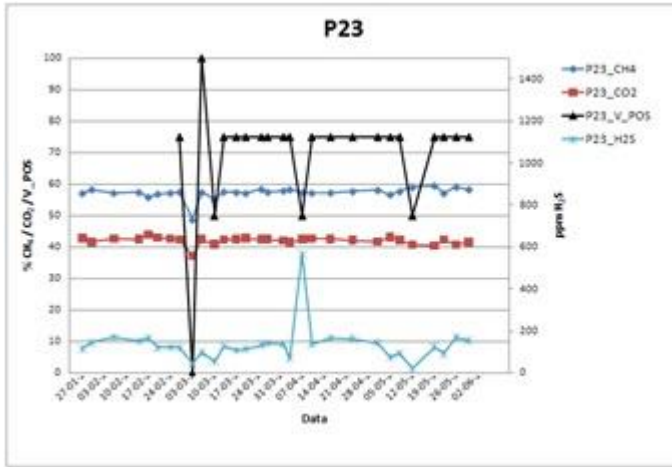


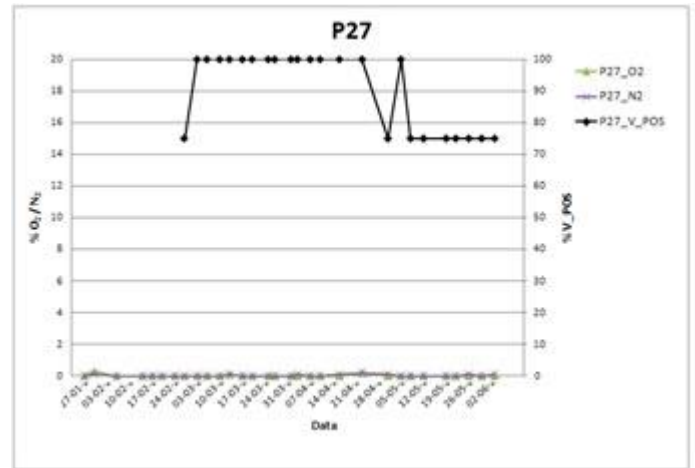
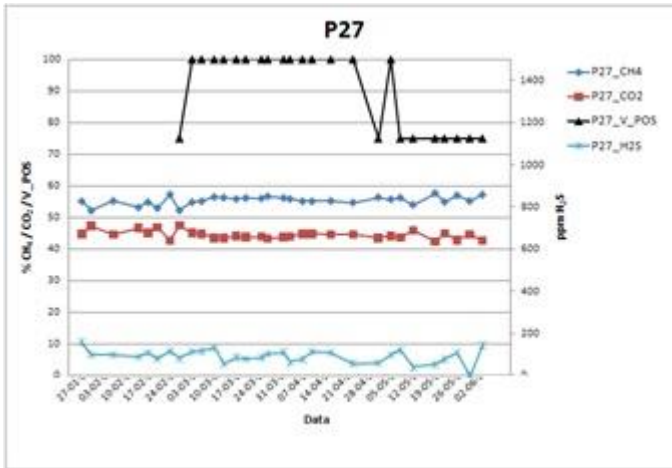
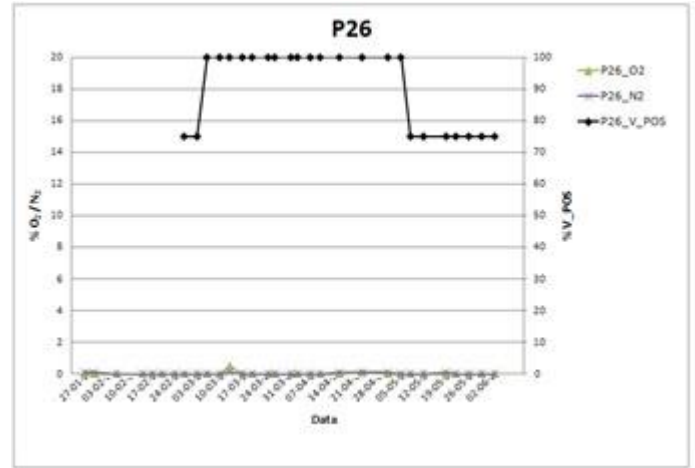
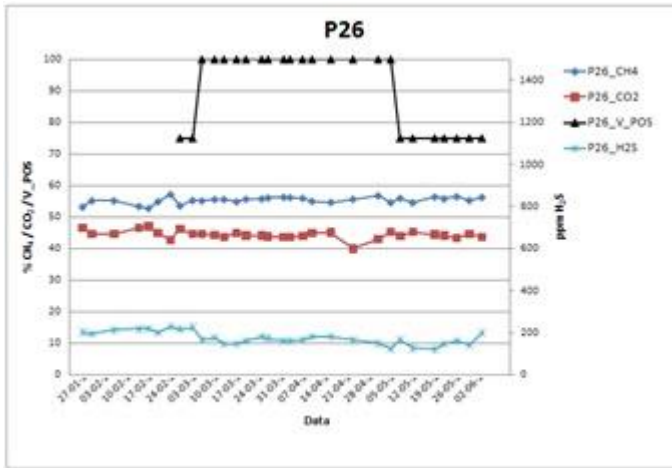












Este trabalho é da inteira responsabilidade do seu autor.